



## ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,  
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

GENERACIÓN DE AURALIZACIONES ORQUESTALES Y  
ANÁLISIS DE SU FIABILIDAD POR MEDIO DE TEST  
PSICOACÚSTICOS

Ignacio Aranzadi de Miguel

Ricardo San Martín Murugarren

Pamplona, 10 de Septiembre de 2012

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
OBJETO DEL PROYECTO.....	3
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	5
1. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE .....	7
1.1. Introducción .....	7
1.2. Señales estímulo: .....	7
1.3. Modelado acústico de salas: .....	8
1.3.1. Modelado basado en ondas (bajas frecuencias):.....	8
1.3.2. Modelado basado en rayos (altas frecuencias):.....	8
1.3.3. Necesidad de datos de reflexión medidos: .....	9
1.4. Reproducción de sonido en 3D: .....	9
1.5. Auralización de respuestas al impulso medidas: .....	10
1.6. Directividad de fuentes sonoras: .....	11
1.7. Técnicas de auralización:.....	13
1.7.1. Técnica multi-canal: .....	13
1.7.2. Técnica multi-fuente: .....	14
1.7.3. Técnica multi-canal multi-fuente: .....	14
2. SALA OBJETO DE ESTUDIO.....	17
2.1. Descripción técnica: .....	17
2.1.1. Situación.....	17
2.1.2. Dimensiones.....	17
2.1.3. Materiales .....	20
2.1.4. Estudio acústico.....	21
2.2. Representación gráfica:.....	22
3. LA ORQUESTA.....	25
3.1. Definición y evolución histórica: .....	25
3.2. Distribución de la orquesta: .....	27
3.3. Los instrumentos musicales: .....	29
3.4. El motivo musical escogido: .....	30
4. CREACIÓN DE AURALIZACIONES .....	33
4.1. Fase 1: Ajuste de la sala .....	33
4.2. Fase 2: Configuración de los globos de directividad .....	41

4.3. Fase 3: Colocación de fuentes y receptores.....	44
4.3.1. Configuraciones de fuente: .....	44
9.3.2. Colocación de receptores:.....	49
4.4. Fase 4: Auralizaciones .....	50
5. CONFIGURACIÓN DE LOS ARCHIVOS DE AUDIO .....	53
5.1. Fase 1: Ajuste de amplitudes .....	53
5.2. Fase 2: Proceso de eliminación de ruido.....	55
5.2.1. Aplicación del Efecto Reducción de ruido .....	56
5.2.2. Configuración aplicada:.....	59
5.3. Fase 3: Tratamiento multipista .....	61
5.3.1. Edición de sesiones multipista en el panel Editor y el Mezclador: .....	62
6. TEST PSICOACÚSTICO .....	65
6.1. Soporte informático: .....	65
6.2. Perfil de los sujetos participantes: .....	68
6.3. Análisis y valoración de los resultados:.....	68
CONCLUSIONES .....	79
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	81
REFERENCIAS.....	83

## OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es evaluar la fiabilidad de los programas de simulación actuales para la generación de auralizaciones orquestales utilizando diferentes configuraciones. Ésta será analizada por medio de test psicoacústicos realizados a músicos profesionales y legos.

Como objetivos secundarios se encuentran la medida de respuestas impulsivas en recintos, la validación del modelo simulado, el estudio de diferentes técnicas de creación de señales orquestales y el diseño de una herramienta en Matlab para la realización y evaluación de test psicoacústicos.



## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

*Auralización es la técnica de crear ficheros sonoros audibles a partir de datos numéricos (simulados, medidos o sintetizados).<sup>1</sup>*

La falta de un lenguaje común y universal entre los diferentes colectivos involucrados en la solución de un problema acústico es una dificultad añadida a la ya de por sí compleja tarea de garantizar la calidad acústica. La diferente formación profesional de arquitectos, consultores acústicos, proveedores, músicos, o incluso oyentes no especializados como usuarios finales, puede ocasionalmente convertirse en punto de desencuentro a la hora de lograr el objetivo deseado: conseguir la satisfacción del cliente. Las *auralizaciones* se convierten en un medio de demostración del efecto auditivo que tendrían diferentes configuraciones acústicas, ahorrando consideraciones técnicas a las personas no habituadas al lenguaje propio de la disciplina acústica.

Sin embargo, los sistemas de auralización actuales todavía no proporcionan recreaciones realmente fidedignas en la que diseñador o consultores acústicos puedan confiar plenamente. En los últimos años, se han solventado determinadas dificultades, pero existen problemas que requieren un mayor análisis. La directividad de las fuentes sonoras, la naturaleza “anecoica” de las señales a simular (sobre todo en el caso de señales orquestales), el propio modelado de la propagación sonora, las bases de datos disponibles sobre parámetros de entrada necesarios e incluso la propia reproducción del sonido auralizado, son algunos de los temas en los que se centra el esfuerzo investigador en la actualidad.

5

En este PFC se pretende analizar, por medio de test psicoacústicos basados en auralizaciones realizadas con diferentes configuraciones, la parte correspondiente al modelado de grandes orquestas, una señal estímulo esencial cuando se aborda el diseño de auditorios.

Dichas configuraciones se han concretado en tres modelos diferentes. La primera configuración pretende ser una versión lo más realista posible aplicando una fuente a cada instrumentista dentro de la orquesta y aplicando globos de directividad propios de cada instrumento. Una segunda configuración pretende encontrar una zona de frontera en cuanto al número de fuentes necesario para conservar un nivel de realismo suficientemente elevado, agrupando secciones de instrumentos en una sola fuente omnidireccional cada sección. La tercera configuración pretende comprobar la falta de realismo que se genera al aplicar una sola fuente omnidireccional para representar a una gran orquesta.

Por otro lado se han escogido dos receptores para comprobar las posibles diferencias en la percepción en cuanto a posicionamiento del oyente. Un receptor se encuentra en la zona de público y el otro en el lugar correspondiente al director de la orquesta, lo que permite percibir las diferencias entre escuchar a la orquesta dentro del escenario y en medio de las fuentes y la escucha desde fuera del escenario en la zona de audiencia.

---

<sup>1</sup> Auralization. M. Vorländer, Springer 2008.

A esto se añade una última diferenciación que se basa en las características acústicas de la sala simulada. El primer modelo corresponde a un ajuste del auditorio del Conservatorio Superior de Música de Navarra y el segundo modelo es una versión virtual de este mismo auditorio acondicionando todas las superficies con un coeficiente de absorción del 70%. Esta prueba busca descubrir cómo influyen las características de la sala, en especial los tiempos de reverberación, en la capacidad de percibir diferencias sutiles en el sonido.

En total se han generado 12 pistas de audio distintas. La señal de audio anecoica es un pasaje orquestal que se encuentra en la base de datos del programa de software Odeon.

A la hora de formular el test psicoacústico se ha decidido realizar una pregunta genérica que plantea cuál es el nivel de realismo percibido por el sujeto, pidiéndole poner nota a cada audio y en comparación a las tres configuraciones de fuentes anteriormente descritas. Por el carácter ambiguo de la pregunta formulada se añade un comentario de texto en el que se pide explicar en qué se fundamenta la calificación elegida cada vez. El test se ha realizado a un total de 60 sujetos, 30 músicos y 30 legos. El análisis de los test se ha basado en el estudio de histogramas de las calificaciones recogidas.

# 1. RESUMEN DEL ESTADO DEL ARTE

## 1.1. Introducción

La auralización es el proceso por el cual se realiza un modelo en 3D de un espacio que se hace audible mediante la convolución de la respuesta al impulso del espacio con una señal estímulo anecoica. Una de las principales áreas de aplicación de la auralización es el diseño de salas de conciertos. Durante años se ha buscado la posibilidad de escuchar una simulación realista de la sala antes de su construcción. Sin embargo, los sistemas de auralización todavía no proporcionan una auralización auténtica en la que diseñador o consultores acústicos puedan confiar plenamente. En este resumen se analizan las dificultades ya solventadas y los problemas que necesitan mayor investigación.

Técnicamente, el proceso de auralización es una convolución de la señal estímulo anecoica y una respuesta al impulso de un espacio. La respuesta al impulso espacial, que contiene información sobre las direcciones de entrada directa del sonido y reflexiones, se puede obtener con la simulación de la propagación del sonido en un modelo en 3D. Básicamente, el proceso requiere de la reproducción de tres aspectos con la mayor precisión posible:

1. Directividad en 3D de la fuente o fuentes de sonido.
2. Propagación del sonido en un espacio en 3D.
3. Reproducción del sonido espacial.

7

Además, se requiere de grabaciones anecoicas adecuadas.

## 1.2. Señales estímulo:

Una fuente típica de sonido en una sala de conciertos es una orquesta sinfónica, que no es una fuente de sonido puntual como se aplica en ocasiones. Por tanto, es necesaria una grabación anecoica de toda una orquesta y es preferible que cada intérprete o, al menos, cada sección sea grabada por separado. De este modo, la auralización puede realizarse a partir del tratamiento de cada instrumento o sección como una fuente puntual y, por tanto, una orquesta se construye como un conjunto de fuentes diferenciadas.

Las grabaciones anecoicas de música orquestal publicadas son escasas, de las cuales la única que contiene una orquesta completa es Denon. Desafortunadamente esta grabación es muy ruidosa para aplicarla a procesos de auralización. La orquesta completa fue grabada de forma simultánea, con micrófonos situados cerca de cada músico dentro de una concha absorbente construida sobre un escenario de una sala de conciertos. Con esta técnica los distintos instrumentos no están perfectamente separados cada uno en su propio canal. Además, fueron captadas por los micrófonos las reflexiones producidas contra el suelo debido a que no fue cubierto de material absorbente.



También ha sido grabado un conjunto coral con fines de investigación. Estas grabaciones se realizaron en una cámara anecoica. Recientemente, Vigeant ha aplicado grabaciones de una orquesta en auralizaciones multi-canal, pero el material de las grabaciones para el proceso de auralización no ha sido documentado por lo que las grabaciones no están disponibles.

Recientemente, Lokki y Savioja publicaron grabaciones de instrumentos musicales en cámara anecoica en <http://auralization.tkk.fi>. Las grabaciones están a disposición pública para fines académicos.

### **1.3. Modelado acústico de salas:**

El modelado de salas acústicas ha sido estudiado durante más de 40 años, pero todavía no hay un único método que se haya presentado que pueda manejar toda la gama de frecuencias audibles con precisión, y parece que este será el caso para el futuro cercano también. Hay principalmente dos aproximaciones para el modelado, las técnicas basadas en la onda proveen el enfoque más adecuado para bajas frecuencias mientras que las técnicas basadas en rayos son las más precisas de las utilizadas para altas frecuencias.

#### **1.3.1. Modelado basado en ondas (bajas frecuencias):**

8

El modelado acústico basado en la onda tiene como objetivo principal resolver numéricamente la ecuación de onda. Las técnicas tradicionales son los métodos de elemento finito (Finite Element Method - FEM) y elemento de contorno (Boundary Element Method - BEM). El problema es que estas técnicas son computacionalmente demasiado pesadas para tratar toda la gama de frecuencias audibles.

Desde el punto de vista de la auralización tal vez el principio de modelado más interesante sea la simulación de diferencia finita en el dominio del tiempo (Finite-Difference Time-Domain - FDTD). El uso de estructuras de rejilla regular permite una fácil implementación y es computacionalmente eficiente. En especial una de estas técnicas, el método de malla guía de onda (Digital Waveguide Method – DWM), parece interesante. El método combina técnicas del FDTD puro y procesamiento digital de señal haciéndolo posible para usar filtros digitales dentro de una simulación, por ejemplo, en los filtros de reflexión en contornos.

#### **1.3.2. Modelado basado en rayos (altas frecuencias):**

Las técnicas basadas en rayos se fundamentan en la asunción geométrica de las salas acústicas en la que todos los fenómenos de onda de sonido son descuidados. Esto significa que el sonido se supone que se comporta de manera similar a la luz y se puede modelar en forma de rayos. El primer subgrupo de estas técnicas está formado por los métodos de búsqueda de los caminos de reflexión especular únicos. Las técnicas más comunes de este tipo son el

método de la fuente imagen (image source method) y el trazado de haces (beam-tracing method). El image source method se basa en la reflexión recursiva de la fuente de sonido contra todas las superficies de la sala. Desde el punto de vista computacional es muy ineficiente, y en la práctica sólo se pueden encontrar las reflexiones de bajo orden. El beam-tracing method intenta optimizarlo, con el objetivo de ser capaces de tratar con geometrías más complejas y órdenes de reflexión superiores. En algunos casos, incluso la refracción puede ser incorporada al modelo. El trazado de rayos (ray-tracing) es el algoritmo más utilizado para modelar la propagación del sonido, ya que, permite un modelado de reflexión más avanzado que el de image source. Una aproximación típica es disparar rayos desde la fuente sonora en todas las direcciones, de acuerdo con el patrón de directividad de la fuente, y el seguimiento de cada rayo hasta que su nivel de energía quede por debajo de un umbral determinado y, al mismo tiempo, realizar un seguimiento de los instantes cuando el rayo alcanza un receptor.

La transferencia de radiación acústica (acoustic radiance transfer method) es una técnica de modelado acústico presentada recientemente basada en la radiosidad progresiva y los modelos de reflexiones arbitrarias.

El método de transferencia de radiación acústica es el más prometedor en cuanto a lograr una auralización auténtica. Además, cuando el poder computacional de los ordenadores crezca el método de malla digital de onda guía será una buena solución desde el punto de vista de la auralización. En la actualidad, los métodos basados en ondas son sólo aplicables a bajas frecuencias, pero junto con los métodos basados en rayos son útiles.

### 1.3.3. Necesidad de datos de reflexión medidos:

Los métodos de modelado acústico de salas pueden modelar la propagación del sonido con gran precisión. Además, el modelado de todo tipo de reflexiones con funciones de distribución de reflectancia bidireccional (Bidirectional Reflectance Distribution Functions - BRDFs) pueden ser implementadas con bastante precisión. Con el modelo BRDFs, la difusión de sonido en superficies como una función del ángulo de entrada es posible, pero el mayor problema es que los datos de difusión medidos no están públicamente disponibles. Las definiciones actuales de coeficientes de dispersión y difusión son demasiado toscas y no incluyen los datos en función de las direcciones de entrada y salida. La metodología de medición de tales medidas ya es conocida, pero hay una gran necesidad de reunir una biblioteca de BRDFs. Hay una base de datos de coeficientes de absorción en <http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/datenbank.htm>.

## 1.4. Reproducción de sonido en 3D:

El oído humano es omnidireccional, oímos los sonidos procedentes de todas las direcciones. Los resultados de la simulación acústica de salas, hechos audibles por medio de la auralización, también deberían ser oídos con un sistema de reproducción que pueda reproducir sonidos en todas las direcciones posibles de forma fidedigna. Sin embargo, en la

práctica es imposible usar altavoces en todas las direcciones. Por ello, los sistemas de reproducción multicanal tratan de cubrir todas las posibles direcciones con un número limitado de altavoces y procesamiento de señal. En la reproducción con auriculares hay solo dos altavoces muy cerca de los oídos y hay que generar todas las direcciones con procesamiento de señal, generalmente aplicando las funciones de transferencia relacionada con la cabeza (Head-Related Transfer Functions - HRTF).

Desde el punto de vista de la auralización, la escucha binaural con auriculares es el método más atractivo, de forma que la acústica de la sala de escucha no suponga un problema. Además, el filtrado de cada reflexión con funciones HRTF es sencillo, aunque requiere una gran potencia de procesamiento. Sin embargo, es sabido que las HRTF son individuales y es muy difícil lograr una auralización binaural auténtica. La ecualización de auriculares es también muy difícil en altas frecuencias, por encima de 5-7 KHz la respuesta de los auriculares con el tímpano es diferente cada vez que se colocan. Parece que las técnicas binaurales no se pueden aplicar en auralización si el objetivo es una auralización auténtica para todo el rango de frecuencias audible.

Los altavoces pueden producir toda la gama de frecuencias audibles de forma más fiable, pero entonces surgen problemas relacionados con la acústica de la sala de escucha, así como la reproducción espacial de cada reflexión individual. La amplitud panorámica basada en vectores (Vector Base Amplitude Panning - VBAP) es una solución sencilla para la reproducción de sonido espacial ya que es computacionalmente barata y permite el uso de configuraciones de altavoces arbitrarias. Además, la amplitud panorámica no crea artefactos audibles al sonar, por ejemplo, errores de fase. Hay también muchas otras técnicas de reproducción del sonido espacial como Ambisonics y síntesis de campo de onda, pero tienden a crear coloración audible al sonido y la reproducción de sonido en 3D real es difícil con estos métodos. Se puede decir que la VBAP es adecuada para la auralización auténtica si hay suficientes altavoces y la sala de escucha es todo lo anecoica posible.

## 1.5. Auralización de respuestas al impulso medidas:

La auralización de respuestas al impulso medidas es una buena manera de estudiar la acústica de los espacios existentes. Sin embargo, hay varios problemas importantes en obtener respuestas al impulso de alta calidad para el proceso de auralización.

El primero está relacionado con la directividad de las fuentes sonoras. Una fuente de sonido aplicada a mediciones debe ser capaz de reproducir patrones de directividad similares a los de los instrumentos musicales o a la voz humana cantada. Se han documentado algunos intentos de construir fuentes de sonido controlables, pero sigue habiendo un gran trabajo de investigación pendiente. Cuando una buena fuente de directividad controlable está disponible, puede ser medida la posición individual de cada instrumento de una orquesta con la directividad correcta y puede ser representada una orquesta completa con un grupo de fuentes puntuales con radiación independientemente.

Otro problema importante es la captura de sonido en 3D para que luego pueda reproducirse de forma transparente. Como se menciona antes, las técnicas binaurales son problemáticas para las frecuencias altas, aunque las grabaciones hayan sido realizadas con cabezas reales. Hay una técnica nueva prometedora para la reproducción multicanal en altavoces, representación espacial de la respuesta al impulso (Spatial Impulse Response Rendering - SIRR). Con SIRR se puede medir la respuesta al impulso espacial de una sala y ser aplicada con cualquier configuración de altavoces para su reproducción. También se ha desarrollado más la metodología y la codificación direccional de audio (Directional Audio Recording - DirAC) permite la grabación y reproducción de audio de forma bastante clara.<sup>2</sup>

## 1.6. Directividad de fuentes sonoras:

Otro aspecto importante en el campo de la auralización son las características de radiación de las fuentes sonoras. En una orquesta sinfónica, cada instrumento tiene su propio patrón de directividad dependiente de la frecuencia y que se debe tener en cuenta de cara al proceso de auralización.

Se puede encontrar información sobre las características direccionales de los instrumentos musicales en el trabajo presentado por Meyer<sup>34</sup> y algunos datos numéricos sobre estas investigaciones están disponibles en internet. Además, Fletcher y Rossing<sup>5</sup> hablan de la directividad de los instrumentos. Las recientes grabaciones anecoicas se han hecho con veinte micrófonos montados formando un dodecaedro alrededor del intérprete. Estas grabaciones permiten analizar la directividad de los instrumentos.

11

En auralización, al menos dos métodos diferentes para modelar la directividad de los instrumentos han sido propuestos. El primer método, filtros direccionales, diseñados para que coincidan con las directividades conocidas, se utilizan para las grabaciones de un solo instrumento, presentado por Savioja<sup>6</sup>. Otra forma consiste en representar una fuente de sonido en auralización como una fuente puntual, pero este punto emite señales anecoicas diferentes en distintas direcciones. Este método, denominado como auralización multi-canal, requiere grabaciones anecoicas desde varias direcciones al mismo tiempo<sup>7</sup>. Ambos métodos tienen sus pros y contras, y se requiere más investigación para encontrar la mejor solución posible.

Se han llevado a cabo en un estudio evaluaciones de las predicciones y auralizaciones con el programa de modelado acústico de salas Odeon mediante tres tipos de fuente

<sup>2</sup> State-of-the-art in auralization of concert hall models – What is still missing? Tapio Lokki, Lauri Savioja. Helsinki University of Technology, Department of Media Technology, Finland. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting. August 17-19, 2008, Reykjavic, Island.

<sup>3</sup> Acoustics and the performance of Music. J. Meyer. Verlag das Musikinstrument, Frankfurt/Main, 1978.

<sup>4</sup> The sound of the orcherstra. J. Meyer. J. Audio Eng. Soc., 41(4):203-213, April 1993.

<sup>5</sup> The phsysics of Musical instruments. J. Meyer, T. D. Rossing. Springer, New York, 1991.

<sup>6</sup> Creating interactive virtual acoustic enviroments. L. Savioja, J. Huopaniemi, T. Lokki, R. Väänänen. J. Audio Eng. Soc. 47(9):675-705, 1999.

<sup>7</sup> A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. F. Otonto, J. H. Rindel. Acta Acustica united with Acustica, 91(5):902-906, 2005.

direccional con la misma potencia sonora: (a) Una fuente omnidireccional, (b) tres fuentes con características direccionales realistas basadas en medidas de instrumentos reales (piano, violín y voz cantada); y (c) una fuente artificial radiante extremadamente direccional.

Se han realizado análisis objetivos de nueve combinaciones emisor/receptor en una sala simple sobre tres parámetros acústicos: nivel de presión sonora relativa (Sound Pressure Level - SPL), tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), e índice de claridad musical ( $C_{80}$ ). Se han creado auralizaciones para dos combinaciones emisor/receptor y se han hecho test psicoacústicos con 28 sujetos.

Los resultados muestran que, objetivamente, las diferencias en SPL eran insignificantes para la mayoría de los casos. Algunas diferencias en  $T_{30}$  y  $C_{80}$  se encontraron entre la fuente omnidireccional y la direccional realista, sin embargo, los sujetos no percibieron las diferencias correspondientes en las auralizaciones, posiblemente debido a la limitación de los datos de banda de octava disponibles. Los sujetos diferenciaron significativamente entre auralizaciones de la fuente omnidireccional y las de la fuente direccional extrema. Los resultados subjetivos de comparar estas dos fuentes en términos de reverberación, claridad y realismo fueron generalmente consistentes con los datos objetivos, aun teniendo en cuenta que la combinación emisor/receptor y la pista musical tuvieron alguna influencia en los resultados.<sup>8</sup>

El estudio de la directividad de las fuentes ha sido explorado en profundidad por Otondo y Rindel quienes realizaron medidas de directividad de tres instrumentos musicales utilizando una matriz de trece micrófonos, con ocho micrófonos en el plano horizontal y cinco en el plano vertical. Emplearon las características direccionales de tocar tres tonos particulares para generar cálculos BRIR (Binaural Room Impulse Response) en la banda de octava de 1000 Hz. Estos cálculos fueron comparados con cálculos BRIR hechos con una directividad promedio en la banda de octava de 1000 Hz realizada a través de los tres tonos. La comparación entre ambos casos mostró que la directividad de la fuente tiene un efecto directo en la distribución de parámetros objetivos en una sala, incluyendo nivel de presión sonora (Sound Pressure Level - SPL), índice de claridad musical ( $C_{80}$ ), eficiencia lateral (lateral energy fraction -  $LF_{80}$ ) y tiempo de decaimiento temprano (Early Decay Time - EDT). Posteriormente los test psicoacústicos revelaron que los sujetos pudieron distinguir entre auralizaciones hechas con una directividad específica y la directividad promedio, basado en volumen y tiempos de reverberación. Los resultados para otros parámetros comparados (claridad, localización y timbre) fueron inconclusos.<sup>9</sup>

Más allá, Jukka Pätynen, ha realizado un estudio de directividad de la mayoría de instrumentos presentes en una orquesta sinfónica. Grabó cada instrumento con una matriz de veintidós micrófonos, de los cuales veinte fueron colocados en los vértices de un dodecaedro regular y los otros dos fueron colocados en el frente y encima de la fuente. Fueron grabados siete tonos en tres dinámicas diferentes con cada instrumento para establecer la base de los

<sup>8</sup> Evaluations of output from room acoustic computer modeling and auralization due to different sound source directionalities. Lily M. Wang, Mighelle C. Vigeant. Architectural Engineering Program, University of Nebraska (USA). September, 2007

<sup>9</sup> The influence of directivity of musical instruments in a room. Otondo F, Rindel JH. Acta Acust Unit Acust 2004;90(6):1178-84.

datos de directividad. Los tonos fueron triadas del acorde de La Mayor, abarcando dos octavas del rango dinámico de cada instrumento específico.

Las grabaciones se filtraron con filtros en bandas de tercio de octava para obtener los niveles de presión sonora relativos a cada micrófono con cada nota y en cada banda de tercio de octava. Se promediaron los niveles de presión sonora sobre todos los tonos y dinámicas para formar el patrón de directividad medio de cada instrumento. Posteriormente los datos con bandas de frecuencia separadas y direcciones de los micrófonos se utilizaron entonces como la fuente para la conversión a formato CLF (Common Loudspeaker Format). En este caso se aplicó el formato de CLF tipo 1, que recoge los datos por bandas de octava de modo que se realizó un promediado de los tres tercios correspondientes a cada octava. Las bandas de frecuencia por debajo de las frecuencias más graves excitadas se omitieron previa conversión. En altas frecuencias los datos estuvieron limitados para un tercio de octava donde la relación señal-ruido es suficiente para resolver la directividad. Naturalmente, esto depende del instrumento en cuestión.<sup>10</sup>

## 1.7. Técnicas de auralización:

En auralización existen dos técnicas que se emplean por separado y combinadas. Estas son la técnica multi-canal, varios canales para definir una fuente y determinar así su patrón de directividad, y la técnica multi-fuente, que consiste en recrear la auralización por medio de varias fuentes cuando esta representa un conjunto.

13

### 1.7.1. Técnica multi-canal:

Una investigación empleando la metodología de auralización multi-canal conocida para determinar los beneficios de incrementar el número de canales fue presentada por Vigeant y Wang.

La primera evaluación subjetiva fue dirigida a examinar cómo los parámetros acústicos, como tiempo de reverberación, varían cuando se utilizan cuadrantes (un cuarto de una fuente esférica) o treceavas (una esfera dividida en trece partes) de fuentes para crear las respuestas al impulso binaurales. Las mayores diferencias encontradas fueron entre las distintas secciones de la esfera, del orden de varios JNDs (Just Noticeable Difference). A este le siguieron dos estudios subjetivos, primero para determinar si las auralizaciones realizadas con un mayor número de canales suena más realista y se percibe mayor amplitud de fuente, utilizando instrumentos musicales solistas variando los índices de directividad de las fuentes. En conjunto, los sujetos percibieron las auralizaciones con mayor número de canales como más realistas, mientras que los resultados sobre el tamaño de fuente percibido fueron menos claros. El segundo estudio subjetivo evaluó el nivel de dificultad con que los sujetos pudieron identificar la orientación de la fuente en función del número de canales. Los resultados indican

---

<sup>10</sup> Directivities of orchestra instruments for auralization. J. Pätynen.. EAA Symposium, Espoo, Finland, June 15-16, 2009.

que es más sencillo diferenciar entre distintas orientaciones de fuente cuanto mayor es el número de canales.<sup>11</sup>

### 1.7.2. Técnica multi-fuente:

La grabación de una orquesta sinfónica completa en cámara anecoica es un estímulo esencial para los estudios de auralización en salas de conciertos. Tal material puede conseguirse grabando instrumentos uno a uno en una cámara anecoica. Sin embargo, por razones prácticas la grabación de todas las cuerdas no suele ser posible y en cambio se graban uno o dos de cada instrumento de cuerda. Entonces se plantea la cuestión de cómo deberían representarse las cuerdas en la auralización para que cada sección suene como en una gran orquesta.

Partiendo de esta reflexión, se hicieron auralizaciones con diferente número de fuentes puntuales para cada sección y se organizó un test de escucha para encontrar diferencias de percepción. Se aplicó un paradigma de comparación A/B y los sujetos compararon las diferencias percibidas en cuanto a número de músicos, amplitud de auralización y preferencia general.

Los resultados sugieren que las cuerdas deberían ser modeladas con una fuente puntual por cada músico pero puede aplicarse una sola grabación en todas las posiciones de cada sección. Sin embargo, las diferencias encontradas son muy pequeñas y parece que también pueden hacerse auralizaciones razonablemente buenas representando todas las cuerdas con solamente cinco fuentes puntuales cuidadosamente seleccionadas, una por cada sección.<sup>12</sup>

14

### 1.7.3. Técnica multi-canal multi-fuente:

Las auralizaciones suelen realizarse con grabaciones de un canal en cámara anecoica a instrumentos solistas. En una investigación se crearon auralizaciones de toda una orquesta utilizando una técnica de auralización multi-canal multi-fuente, incluyendo grabaciones individuales en cámara anecoica de cinco canales para cada parte instrumental de dos sinfonías.

En el primer estudio, estas auralizaciones fueron comparadas subjetivamente con auralizaciones orquestales hechas utilizando (a) una fuente omnidireccional, (b) una fuente de superficie, y (c) otra por el método mono-canal multi-fuente. Los resultados muestran que las auralizaciones multi-fuente fueron calificadas como más realistas que las fuentes de superficie y que tienen mayor ancho de fuente que la fuente omnidireccional. No se encontraron

<sup>11</sup> Objective and subjective evaluations of the multi-channel auralization technique as applied to solo instruments. Mighelle C. Vigeant, Lily M. Wang (University of Nebraska, USA), Jens Holger Rindel (Technical University of Denmark). Applied Acoustics, Elsevier, 2010.

<sup>12</sup> How many point sources is needed to represent strings in auralization? T. Lokki. Helsinki University of Technology, Finland. International Symposium on Room Acoustics. Sevilla, September 10-12, 2007.

diferencias significativas entre las auralizaciones multi-fuente mono-canal y multi-canal de cinco canales.

En un segundo estudio subjetivo, se crearon auralizaciones mono-canal y cinco-canal multi-fuente para tres configuraciones orquestales diferentes: “Contemporánea”, con las secciones de primeros y segundos violines situadas adyacentes entre ellas, “tradicional”, con las secciones de primeros y segundos violines enfrentadas entre ellas, y “aleatoria”, con las secciones de instrumentos mezcladas por el escenario. Generalmente los sujetos son capaces de distinguir entre estas configuraciones orquestales cuando escuchan auralizaciones multi-fuente, sin embargo, los sujetos solo pudieron discernir diferencias entre las configuraciones orquestales con las auralizaciones multi-canal multi-fuente. En general, la técnica de auralizaciones multi-fuente pareció ser un método más efectivo para crear auralizaciones orquestales realistas, pero utilizar grabaciones anecoicas multi-canal con el método multi-fuente no fue, aparentemente, una ventaja consistente en cualquier caso.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Investigations of orchestra auralizations using the multi-channel multi-source auralization technique. Mighelle C. Vigeant, Lily M. Wang (University of Nebraska, USA), Jens Holger Rindel Technical (University of Denmark). Acta Acustica united with Acustica, vol. 94 (2008) 866-882.





## 2. SALA OBJETO DE ESTUDIO

### 2.1. Descripción técnica:

#### 2.1.1. Situación

El auditorio del Conservatorio Superior de Música de Navarra se encuentra dentro del complejo denominado como Ciudad de la Música, situado en el Paseo Pérez Goyena nº1, Pamplona.

#### 2.1.2. Dimensiones

El auditorio, también conocido como Aula Fernando Remacha, tiene capacidad para 375 espectadores y el volumen de la misma es de 4144 m<sup>3</sup>.

El auditorio se divide en dos partes fundamentales: el escenario y la audiencia. Se describen por separado a continuación:

##### Escenario

El auditorio dispone de un escenario en forma de abanico, en el que las paredes laterales y el techo se abren hacia la audiencia. Longitudes del escenario:

- Anchura en el fondo : 13 m
- Anchura máxima: 14,9 m
- Fondo de escenario: 11 m

El techo del escenario también se va abriendo hacia arriba, como se puede ver en la figura 2.1 con 3 pendientes diferenciadas. Longitudes:

- Distancia al techo en el fondo: 5,6 m
- Distancia al techo máxima: 9 m

En los laterales dispone de unos escalones verticales desde el fondo hasta el final del escenario, con una altura de 2 metros. La longitud de los mismos es de 1,7 metros y la altura del escalón de 0,1 metros.

El escenario tiene a los laterales dos escaleras, pegadas a la pared, que facilitan el acceder al mismo. La altura del escenario respecto al suelo de audiencia es de 1 metro.

##### Audiencia

La audiencia se compone de dos zonas diferenciadas: la platea, que es la más grande, con 273 butacas y el palco, con 102. Ambas están inclinadas, como se puede ver a continuación en la figura 2.1.

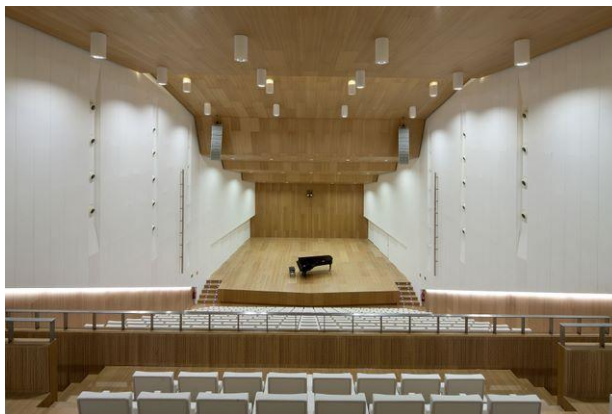


Figura 2.1. Fotografía del auditorio desde la parte superior

### Platea

Como se ha dicho, es una zona inclinada (siendo la primera fila la más baja) compuesta en su totalidad por 273 butacas, distribuidas en 13 filas de 21 butacas cada una. Al ser un plano inclinado, como pasillos existen escaleras, situadas en los laterales. Cada fila tiene un desnivel de 0,6 metros respecto a la anterior. Longitudes:

- Ancho de la zona: 15,8 m
- Longitud de la zona: 13,1 m
- Ancho de cada pasillo: 1,9 m

Desnivel (diferencia de altura entre primera y última fila): 6,5 metros.

18

Las paredes laterales de la audiencia tienen un rebaje de 0,2 metros y 2 metros de altura que se extiende desde el principio de la zona de audiencia hasta el final de la zona de platea.

### Palco

La platea y el palco están separados por un pasillo. En dicho pasillo se encuentran, a ambos lados, las entradas superiores del auditorio. Delante de la zona de palco también se ha instalado un panel resonador que cubre todo el ancho del palco. Estas características se pueden ver en la figura 2.2, que muestra una foto del pasillo donde a la izquierda se encuentra la platea y a la derecha el palco.

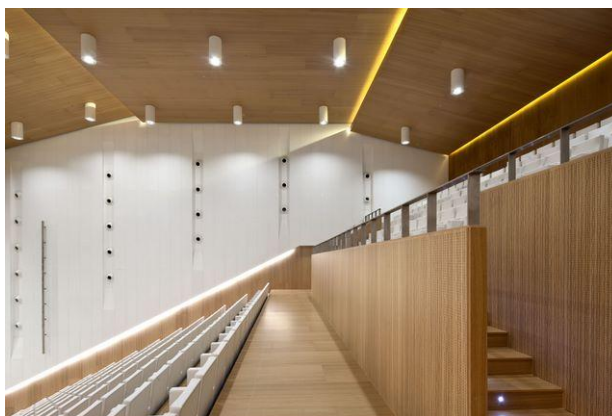


Figura 2.2. Fotografía del pasillo entre platea y palco

En el pasillo separador de ambas zonas de audiencia también se han habilitado, a ambos lados, unas pequeñas escaleras para acceder al palco. Éste también se encuentra inclinado y se divide en 3 sub-zonas:

Zonas 1 y 3: simétricas, se sitúan en los laterales. Tienen 27 butacas cada una.

Zona 2: en forma rectangular, es la zona central, dispone de 48 butacas.

Para acceder a los asientos, el palco tiene dos escaleras que se encuentran a ambos lados de la zona central.

El techo, en la zona de audiencia, también tiene tres inclinaciones diferentes, como se puede ver en la Figura 2.2.



Figura 2.3. Fotografía del auditorio, tomada desde el fondo del escenario

La figura 2.3 muestra la distribución de las butacas en la audiencia, tal y como se ha explicado anteriormente.

### 2.1.3. Materiales

En lo que a absorción acústica se refiere, la sala se compone de cuatro tipos de materiales diferentes: madera, cristal, butacas y panel perforado, que actúa como resonador (situado separando la zona del palco con la de la platea).

#### Madera

Es el material que más superficie abarca en el auditorio. Reviste el techo, suelo, paredes laterales y escenario. Para las paredes laterales se ha instalado un tipo de madera lacada blanca y una madera rugosa que se encuentra en la zona baja junto a las escaleras, de las cuales sus coeficientes de absorción son desconocidos. Para el resto de madera, se especifican los coeficientes de absorción por octava en la tabla 2.1.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha$	0,15	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,07

Tabla 2.1. Coeficiente de absorción de una de las maderas instaladas

#### Resonadores

Junto al pasillo que separa la zona de platea de la zona de palco se encuentra instalado un panel resonador que se extiende de lado a lado del auditorio. Tiene una altura de 2 metros y sus coeficientes de absorción vienen especificados en la figura 2.4.

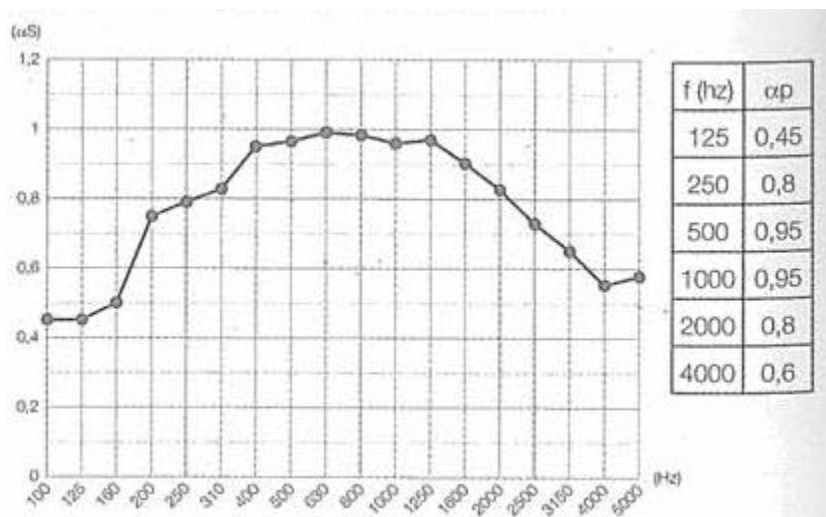


Figura 2.4. Coeficientes de absorción del panel perforado "Onde Wave"

#### Butacas

El total de asientos instalados en el auditorio asciende a 375, divididos en platea y palco. Las butacas son de cuero blanco, modelo "Prima" de la empresa Dynamobel. Los coeficientes de absorción están especificados en la figura 2.5.

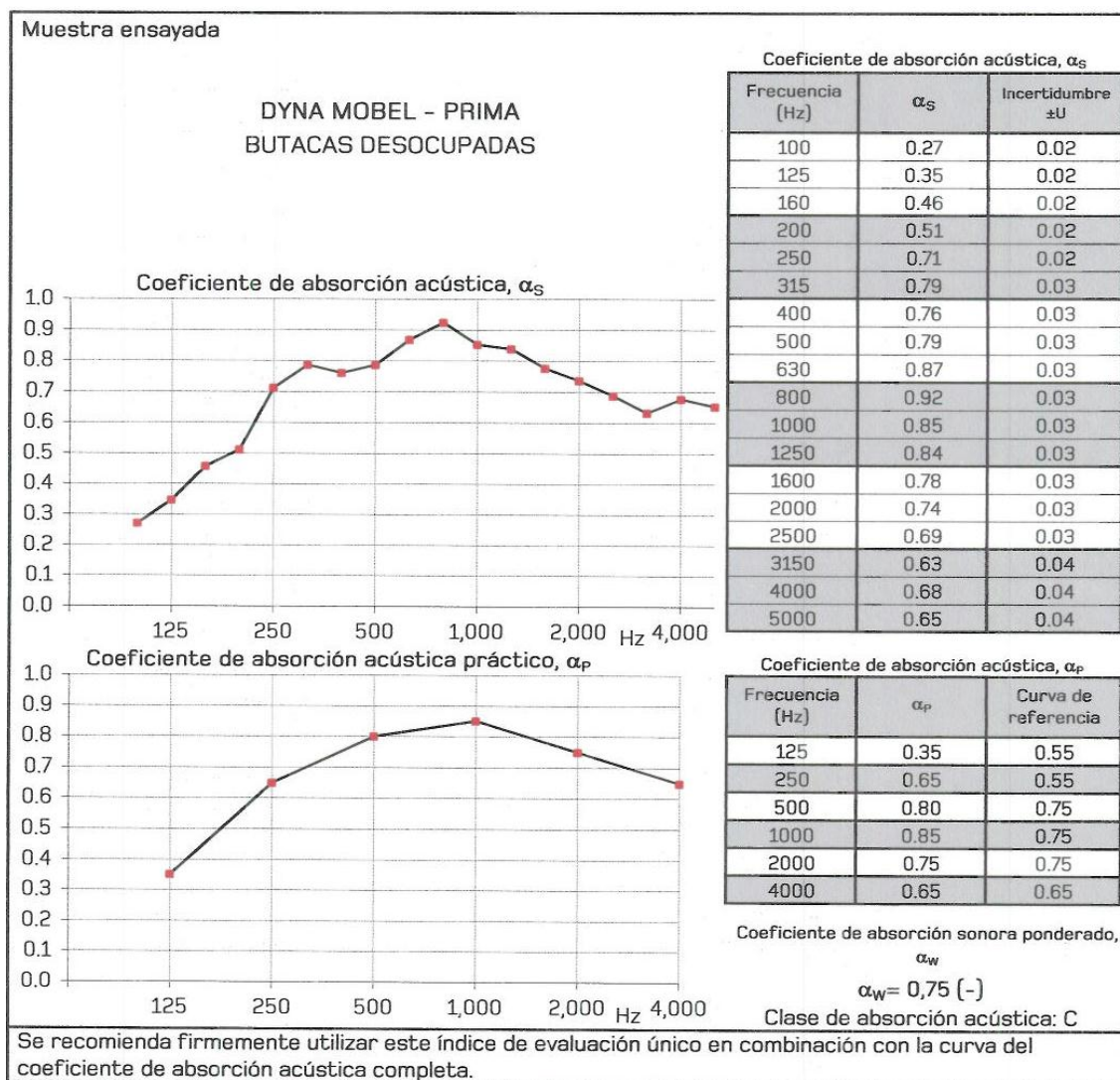


Figura 2.5. Coeficientes de absorción de butacas tipo "Prima"

Estos coeficientes de absorción son orientativos para la realización del ajuste de la sala simulada en el programa de software Odeon. Los materiales de los que no se dispone información específica, se han basado en la información de bases de datos de materiales con características similares.

#### 2.1.4. Estudio acústico

Se ha realizado un estudio acústico de la sala según la Norma ISO 3382-1. Para este trabajo se ha empleado el valor promedio del tiempo de reverberación, T30. Este valor ha sido la referencia para el ajuste de la sala. En la tabla 2.2 se representan los resultados, por bandas de octava, de dicho promediado.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
T30 (s)	1,60	1,55	1,78	1,79	2,04	2,38	2,53	1,94

Tala 2.2. Promediado de T30

## 2.2. Representación gráfica:

Para representar gráficamente la sala se ha empleado el programa de software libre Google SketchUp (versión 7). Previamente se hicieron medidas in situ de la sala y se adquirieron planos acotados del proyecto de obra original.

El propósito de esta representación gráfica responde a dos objetivos. Por un lado, la utilidad de tener un modelo en tres dimensiones como imagen gráfica para estudiar y mostrar las características visuales de la sala. Por otro lado, el diseño gráfico de la sala en tres dimensiones permite trasladar dicho diseño al programa Odeon para utilizarlo como modelo sobre el que practicar las simulaciones acústicas.

En las figuras 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 se muestran los distintos planos del auditorio desde el exterior. Las figuras 2.10 y 2.11 son capturas del interior del auditorio.

22

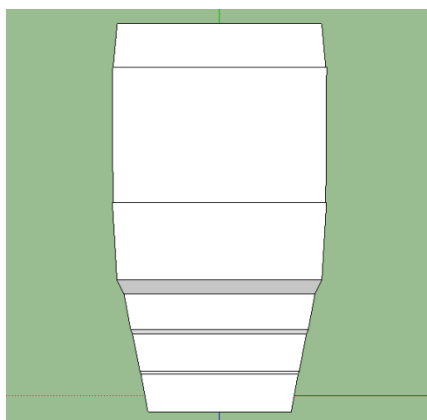


Figura 2.6. Planta

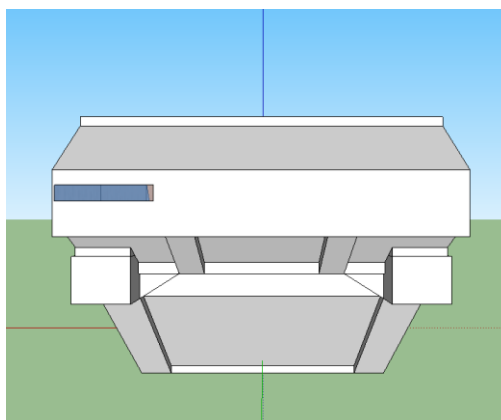


Figura 2.7. Alzado (Posterior)

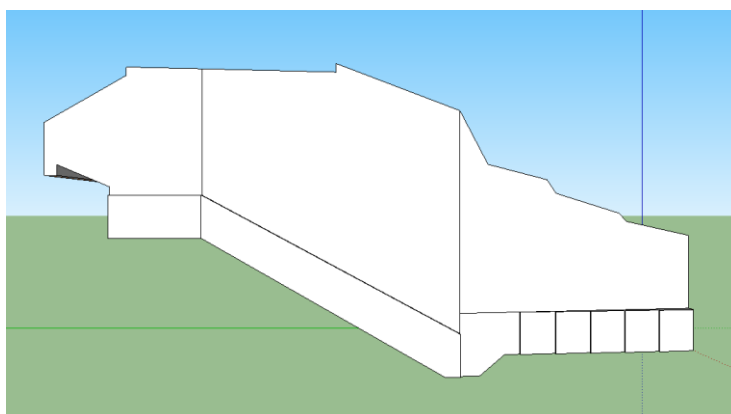


Figura 2.8. Perfil (izquierdo)



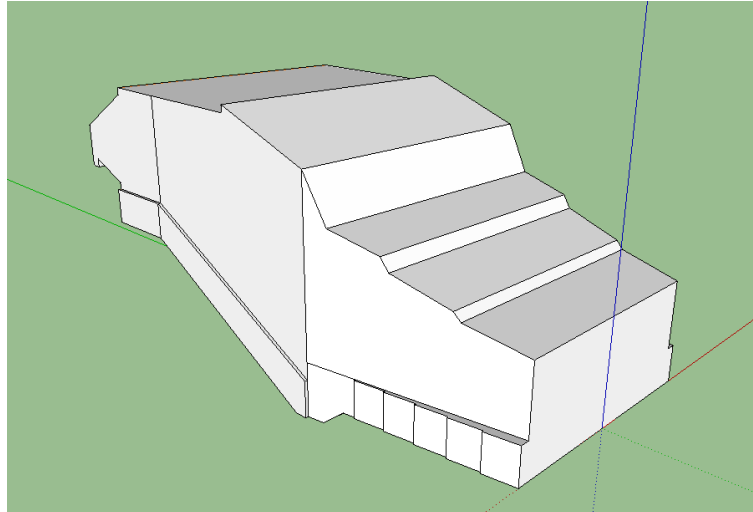


Figura 2.9. Vista isométrica

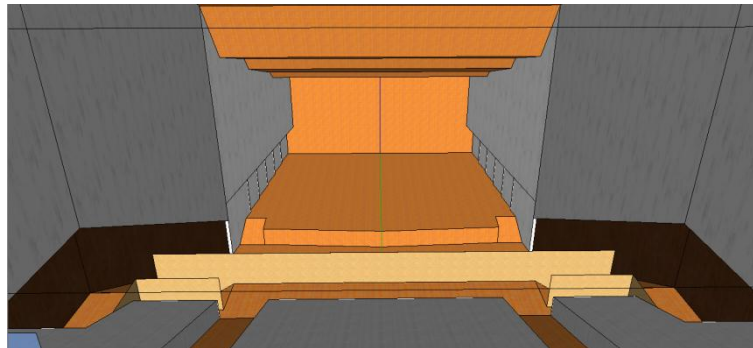


Figura 2.10. Vista interior desde el fondo de la sala

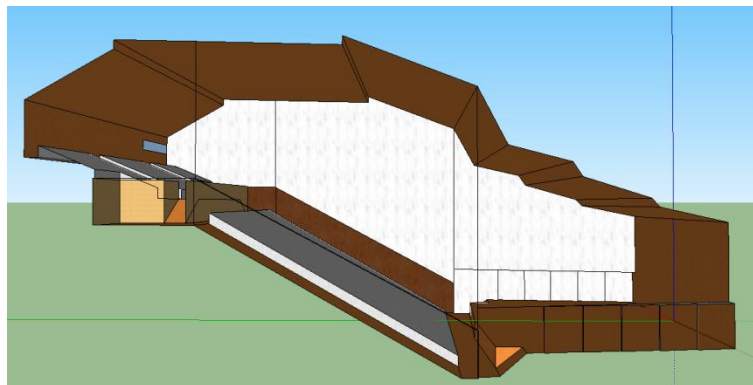


Figura 2.11. Vista interior lateral

Para un mejor aspecto visual se han aplicado texturas a las capas para distinguirlas. A su vez, se han creado diferentes tipos de capa según el tipo de material y la zona. La información de las capas se conserva en el software Odeon por lo que es una herramienta que ayuda al trabajo posterior. Las capas son las siguientes: Madera clara (suelo y pared del escenario), pared blanca, pared oscura (superficie de madera rugosa junto a las escaleras), resonadores, butacas, cristal y techo.



Como puede observarse en las figuras 2.10 y 2.11, las escaleras han sido representadas como rampas. Al no representar cada escalón se reduce considerablemente el número de superficies y como consecuencia la carga computacional necesaria al realizar simulaciones acústicas. Para no perder realismo en la simulación acústica se ha aplicado un coeficiente de difusión a las superficies que representan escaleras de forma que el resultado final sea el mismo a efectos prácticos. En total se han dibujado 99 superficies.

Se ha tomado la decisión de representar la zona de audiencia con una elevación de 0,5 m sobre la superficie del suelo. Existe controversia acerca de la efectividad de esta técnica. Habitualmente también se representa la superficie de audiencia sin diferenciarla del suelo, lo que permite mantener los receptores alejados de la superficie evitando así posibles problemas. Sin embargo, en otras ocasiones se eleva unos centímetros buscando representar con mayor fidelidad el espacio que ocupan las butacas, como es el caso. Los receptores de la audiencia se sitúan a 1,20 m sobre el suelo, de esta forma se mantienen alejados 0,7 m de la superficie más cercana lo cual es suficiente para no tener problemas a la hora de realizar simulaciones.

La extensión de los archivos originales de Google SketchUp es .skp. Para realizar la simulación de Odeon ha sido necesario exportar el archivo con la extensión .dxf.

## 3. LA ORQUESTA

### 3.1. Definición y evolución histórica:

*Orquesta* es una antigua palabra griega que significa “lugar de danza”. En Grecia, durante el siglo V a.C., las obras de teatro se representaban en teatros al aire libre, llamados anfiteatros. *Orquesta* era el nombre con que se designaba el espacio situado frente al área principal, destinada a la representación, y que utilizaban tanto coro, cantantes, bailarinas o instrumentistas.

Mucho más tarde, a principios del siglo XVII, se representaban en Italia las primeras óperas. Originalmente pretendían ser una imitación del antiguo teatro griego y por esta razón se utilizó el término *orquesta* para designar el espacio entre la escena y el público, que ocupaban los instrumentistas. Pronto *orquesta* pasó a denominar al conjunto de músicos y a los instrumentos que intervienen.<sup>14</sup>

Por este motivo, hoy en día se emplea la palabra orquesta para designar un conjunto relativamente grande de instrumentos que se interpretan de forma colectiva.

El número y tipo de instrumentos puede variar considerablemente de una pieza a otra según la combinación, más o menos precisa, requerida por el autor.

La forma, disposición y tamaño de la orquesta ha estado en constante cambio durante los últimos cuatro siglos. Los motivos de estos cambios están directamente relacionados con el desarrollo tecnológico de los instrumentos y la evolución estética de la música.

25

Inicialmente, durante el siglo XVII, la época conocida como Barroco, la orquesta estaba constituida de este modo:

- Cuerdas: ocho violines, tres violas, dos violonchelos, un contrabajo y un clavecín opcional.
- Viento-madera: dos flautas, dos oboes y un fagot. Oboes y flautas eran tocados por los mismos músicos, por lo que no había coexistencia sonora de las cuatro voces.
- Viento-metal: dos trompetas y dos trompas.
- Percusión: dos timbales.

Mozart y Haydn, autores más representativos del S. XVIII, época conocida como clasicismo, hicieron cambios en la estructura de la orquesta: la introducción de dos clarinetes, un segundo fagot, un trombón, que era tocado por el segundo trompa (es decir, no coexistían las dos trompas junto con el trombón).

Hacia el año 1800, comienzo de la época denominada Romanticismo, la orquesta creció y se dispuso de la siguiente forma:

---

<sup>14</sup> Instruments of the orchestra. Roy Bennet. Cambridge University Press, 1982. Trad. español. Los instrumentos de la orquesta. Akal, 1999.

- Cuerdas: veinte violines, ocho violas, ocho violonchelos, cuatro contrabajos.
- Maderas: dos flautas, dos oboes, dos clarinetes y dos fagotes.
- Metales: dos trompetas, y cuatro trompas. Los trombones se añadirían paulatinamente con Beethoven, que llegó a usar tres en las Sinfonías N° 5, N° 6 y N° 9.
- Percusión: dos timbales

Durante el siglo XIX la orquesta se expandió considerablemente, Beethoven contribuyó especialmente. En Cuerdas aumentando el número de todos los instrumentos, en Maderas introduciendo el flautín, el contrafagot, en ocasiones un corno inglés y algunas variantes de clarinete, en Metales fijó definitivamente el uso de trompetas, comenzó a utilizar trombones y recomendó el uso de la tuba y en Percusión amplió el número de los dos timbales clasicistas a cuatro o hasta cinco, e introdujo el bombo, los platos y el triángulo (Haydn ya había introducido estos dos últimos, platos, triángulo y el contrafagot, en ocasiones extraordinarias). A mediados de siglo, se desarrolló el siguiente agrupamiento:

- Cuerdas: treinta violines, doce violas, diez violonchelos, ocho contrabajos, un piano y un arpa.
- Maderas: un flautín, dos flautas, dos oboes, un corno inglés, dos clarinetes, un clarinete bajo, dos fagotes y un contrafagot.
- Metales: tres trompetas, cuatro trompas, tres trombones y una tuba.
- Percusión: cuatro timbales y otros instrumentos de percusión, dependiendo de la composición.

26

Richard Wagner añadió la tuba wagneriana (de sonido similar al de la trompa pero con una tesitura inferior).

En el siglo XX, los compositores escribieron para orquestas de inmenso tamaño, incluyendo seis timbales, ocho trompas, cuatro trompetas, cuatro trombones, dos tubas, dos arpas, presencia extra de maderas, celesta, más percusión y más cuerdas, para equilibrar la totalidad del conjunto tímbrico.

El culmen del tamaño de la orquesta se alcanzó en 1910 con la Sinfonía nº 8 de Gustav Mahler, conocida como *Sinfonía de los mil*, que contempla una orquesta de en torno a 200 músicos y varios conjuntos corales.

Esto constituye la denominada *orquesta sinfónica*, pero también existen otros modelos de orquesta como son la *orquesta de cámara*, que es una versión reducida de la orquesta sinfónica, *orquesta de cuerda* (constituida exclusivamente por instrumentos de cuerda) y orquesta de viento y percusión (comúnmente llamada *banda de música*, *banda sinfónica* si incluye algún instrumento de cuerda).<sup>15</sup>

<sup>15</sup> A History of Western music. J. P. Burkholder, D.J. Grout, C. V. Palisca. 7<sup>th</sup> ed. W. W. Norton & Company, Inc. 2006. Trad. español. Alianza Editorial, 2008.

## 3.2. Distribución de la orquesta:

A lo largo de la historia de la música sinfónica han sido numerosas las distribuciones de los instrumentos sobre el escenario. En algunas obras, el compositor especifica la distribución que desea, buscando así posibles efectos sonoros espaciales. Generalmente es el director quien elige la disposición de los músicos basándose en distribuciones estándar, gusto estético o por las condiciones acústicas de la sala.

Históricamente se pueden distinguir hasta cuatro periodos en cuanto a los cambios tanto en la distribución de la orquesta sobre el escenario como en el número y variedad de instrumentos. Estos son: Barroco, Clásico, Romántico y Contemporáneo (figura 3.1).

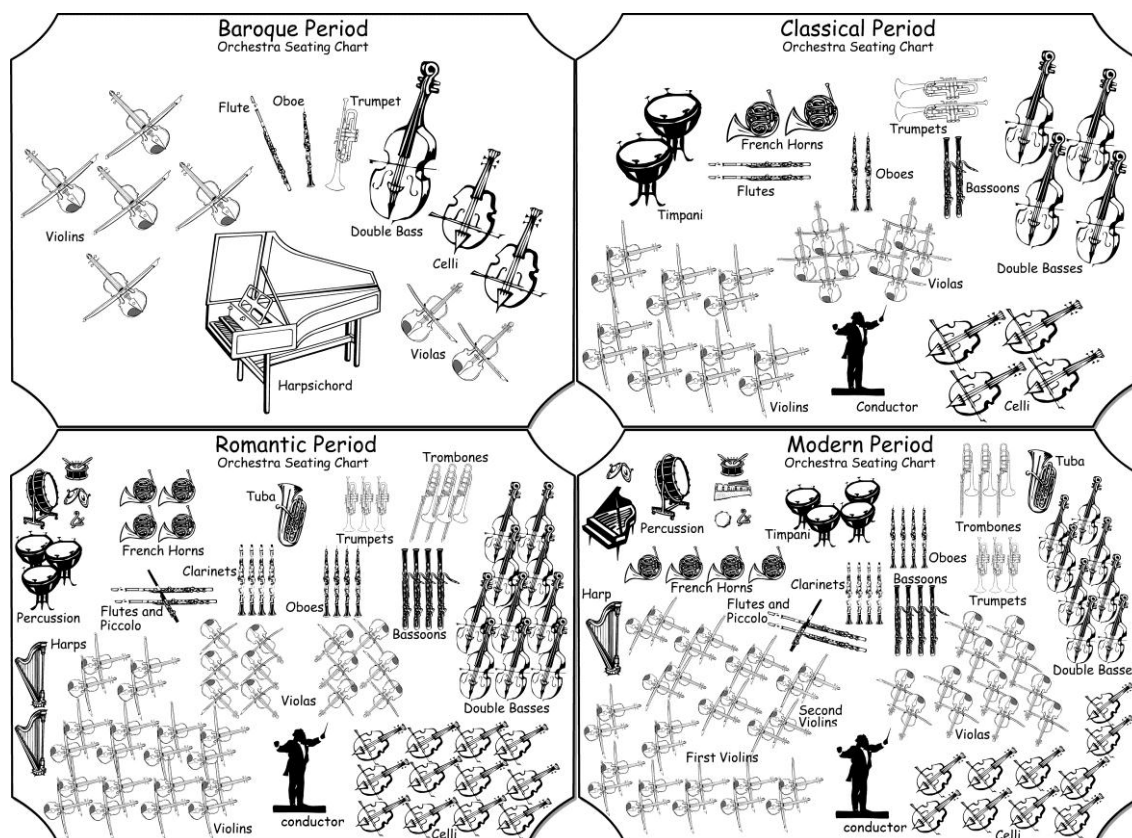


Figura 3.1. Evolución histórica de la orquesta

En la actualidad son habituales tres modelos estándar relacionados con las distribuciones históricas. La más habitual es la que sitúa la sección de viento-madera en dos filas (figura 3.2.a). Sin embargo, algunos directores prefieren la disposición más habitual en el periodo romántico, toda la sección de viento-madera en una línea única (figura 3.2.b). Otra disposición heredada del clasicismo consiste en situar las dos secciones de violines, primeros y segundos, enfrentadas; de esta forma quedan los violines primeros a la izquierda del director y los violines segundos a su derecha (figura 3.2.c).<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Longman handbook of orchestral instruments. Diagram Group. Longman, 1984.

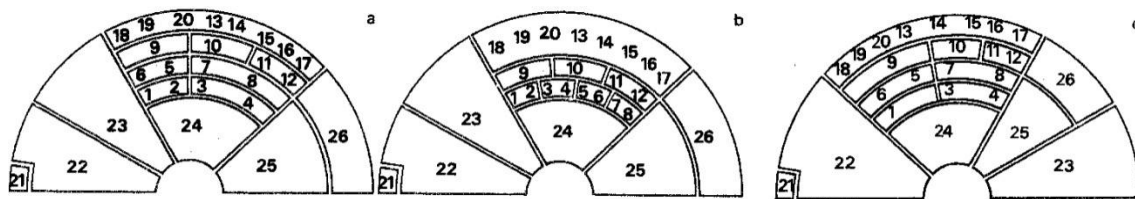


Figura 3.2. Tres diagramas de distribución de la orquesta típicos<sup>18</sup>

#### Viento-madera

- 1 Piccolo
- 2 Flautas
- 3 Oboes
- 4 Corno inglés
- 5 Clarinetes
- 6 Clarinete bajo
- 7 Fagots
- 8 Contrafagot

#### Viento-metal

- 9 Trompas
- 10 Trompetas
- 11 Trombones
- 12 Tuba

#### Percusión

- 13 Tam-tam
- 14 Platillos
- 15 Xilófono
- 16 Lira
- 17 Campanas
- 18 Caja
- 19 Bombo
- 20 Timbales

#### Cuerdas

- 21 Arpa
- 22 1os violines
- 23 2os violines
- 24 violas
- 25 Chelos
- 26 Contrabajo

La configuración más común es la que se aprecia con mayor detalle en la figura 3.3.

28

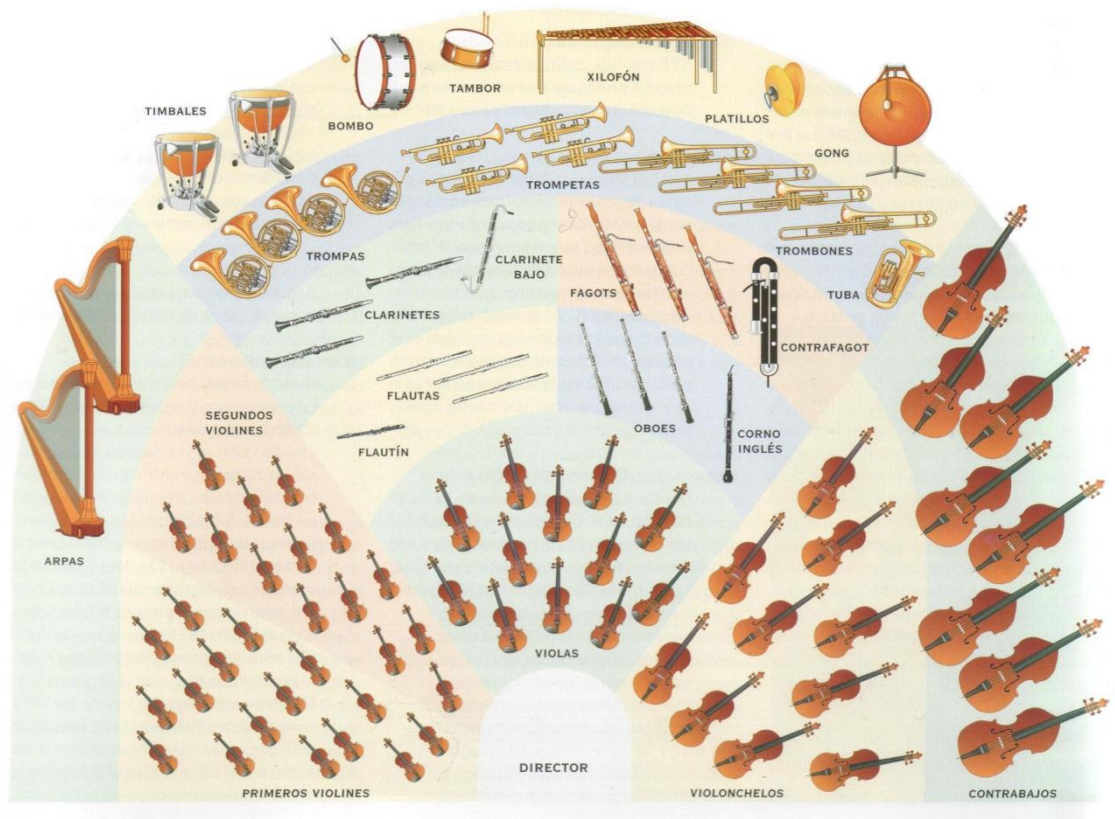


Figura 3.3. Configuración estándar más común para una orquesta



Las cuerdas en las primeras filas. Desde el punto de vista del público, se colocan a la izquierda los violines, en el centro las violas, a la derecha los violonchelos y, tras estos, los contrabajos.

Detrás de las cuerdas se coloca el viento. En primer lugar los viento-madera, generalmente en dos filas. En la primera fila, a la izquierda, las flautas; a la derecha, los oboes. Tras esta fila, se colocan clarinetes a la izquierda y los fagots a la derecha.

Detrás del viento-madera se coloca en otra u otras dos filas el viento-metal. Trompas, a la izquierda; trompetas, en el centro; trombones y tuba a la derecha.

La percusión suele situarse una fila más atrás de la sección de viento-metal y pueden llegar a abarcar toda una fila de lado a lado del escenario.

Casos más extraordinarios son piano, celesta, arpas o saxofones. La colocación de estos suele ser a la izquierda, tras las cuerdas en el caso de piano, arpas o celesta y junto al viento madera en el caso de los saxofones.

En concreto, para la Sinfonía nº 8 de Anton Bruckner no se especifica ninguna distribución. Basándome en las configuraciones más habituales y observadas en distintas interpretaciones de esta pieza, se ha escogido una configuración similar a la anteriormente descrita. La única diferencia es que las trompas se colocan en el lado derecho del escenario, esto es habitual en muchas obras que requieren un gran número de trompistas y de ejecutantes de otros instrumentos en general. Esta disposición consigue proyectar más el sonido de las trompas, ya que, la principal característica de este instrumento es que su campana está curvada hacia atrás, de modo que la mayor cantidad de sonido es proyectada hacia el fondo del escenario en vez de cara al público.

### 3.3. Los instrumentos musicales:

La estructura de una orquesta se divide en varias secciones de instrumentos según sus características comunes. Pueden ser clasificados según su constitución, la característica de su sonido o de qué forma lo producen.

Actualmente, el sistema utilizado en Occidente clasifica a los instrumentos en instrumentos de cuerdas (cordófonos), instrumentos de viento (aerófonos) e instrumentos de percusión (que se dividen a su vez en membranófonos e idiófonos).

Los cordófonos pueden distinguirse, según el modo de producir su sonido, entre los que son de cuerda frotada, pulsada o pellizcada. En el caso de esta obra musical solamente hay presentes cordófonos de cuerda frotada. Esta sección de cuerdas está formada por violines primeros, violines segundos, violas, violonchelos y contrabajos. Básicamente esta selección está fundamentada en el tamaño de los instrumentos y, por consiguiente, del registro; desde los más agudos, los violines, a los más graves, los contrabajos. La distinción entre violines primeros y segundos se debe a la existencia de dos papeles distintos entre grupos de violines.

Dentro de la sección de viento se subdivide en viento-madera y viento-metal.

Los clasificados como viento-madera son llamados así porque generalmente este es el material de que está elaborado su cuerpo. Sin embargo, en la actualidad algunos de estos instrumentos se construyen en metal. Esto se debe a que el nombre les fue dado a la mayoría cuando aún eran fabricados de madera. No obstante, se siguen clasificando dentro de las maderas por su timbre y su sonido característico. Es el caso de los saxofones y la mayoría de las flautas traveseras. Todos tienen una serie de agujeros a lo largo de un tubo, algunos se cubren o destapan mediante una serie de mecanismos denominados llaves.

Según el modo de producir el sonido en los instrumentos de viento-madera, se clasifican en aerófonos de bisel (flautas), de lengüeta simple (clarinetes) y de lengüeta doble (oboes y fagots).

Los instrumentos de viento-metal están compuestos por un tubo de metal (generalmente latón), que puede estar doblado o recto. Todos ellos tienen una terminación en forma cónica o de campana. Para producir el sonido se coloca una boquilla (de forma de copa o cónica) en el tudel, la primera sección del tubo. El modo de ejecución consiste en la vibración de los labios superior e inferior de la boca en el interior de la boquilla.

Al igual que los instrumentos de viento-madera, su tesitura depende de la longitud del tubo. Así, se clasifican de más agudos a más graves. La trompeta son las más agudas seguidas por las trompas, los trombones y la tuba, que es el instrumento de viento-metal que produce sonidos más graves.

30

Los instrumentos de percusión se dividen principalmente en membranófonos e idiófonos. Los membranófonos generan sonido a partir de la vibración de una membrana que es golpeada. En el caso de los idiófonos, el sonido lo produce el propio cuerpo del instrumento.<sup>17</sup>

### 3.4. El motivo musical escogido:

La pieza escogida es una selección de 1'27" del comienzo del segundo de cuatro movimientos (Scherzo. Allegro moderato – Trio. Langsam) de la Sinfonía nº 8 en do menor del compositor austríaco Anton Bruckner (1824-1896).

Los motivos para seleccionar esta pieza son variados. Técnicamente, para la ejecución de las auralizaciones multi-fuente, es especialmente interesante este respecto a los otros proporcionados por el programa Odeon porque es el que más número de pistas de audio individuales provee. A esto se añade un factor estético. Es una obra que pertenece al periodo conocido como Romanticismo en la Historia de la música. Este tipo de obras se caracterizan por albergar un gran número de plantilla para la ejecución de sus obras, como es el caso de esta, además de una gran variedad de instrumentos distintos y gran número de matices.

---

<sup>17</sup> The world of musical instruments. Allan Kendall. Hamlyn, 1972.

La orquestación de la obra consta de: Sección completa de cuerdas (violines primeros y segundos, violas, violonchelos, contrabajos), 3 flautas, 3 oboes, 3 clarinetes, 3 fagotes, 8 trompas, 4 tubas wagnerianas, 3 trompetas, 3 trombones, 1 tuba, timbales, platillos, triángulo, 3 arpas. En el pasaje seleccionado no suenan arpas, tubas wagnerianas, platillos, triángulo y una flauta.

En concreto, la base de datos consta de 47 audios. 8 violines primeros, 4 violines segundos, 4 violas, 2 violonchelos, 2 contrabajos, 2 flautas, 3 oboes, 3 clarinetes, 3 fagots, 3 trompetas, 3 trombones, 8 trompas, 1 tuba y 1 batería de timbales.

Este pasaje comienza en pianísimo, es decir, con una amplitud muy baja y con pocos instrumentos en ejecución, lo que implica poca variedad tímbrica. Finaliza en un *gran tutti*, todos los instrumentistas tocando al mismo tiempo, en *fortissimo*, con mucha amplitud y variedad de timbres.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> Bruckner Symphonies. Philip Barford. RICM, 1986.





## 4. CREACIÓN DE AURALIZACIONES

El principal trabajo de este proyecto se ha realizado con el programa de software Odeon (versión 11). Para la correcta realización de las auralizaciones ha sido necesario dividir el trabajo en cuatro fases que se han realizado en orden cronológico. Estas fases son: Ajuste de la sala, configuración de globos de directividad, colocación de las fuentes y receptores, y convolución y mezcla de audios para generar las auralizaciones.

### 4.1. Fase 1: Ajuste de la sala

Se ha creado una carpeta de trabajo nueva en la que se ha introducido el archivo en formato .dxf del dibujo en 3D de la sala realizado con SketchUp.

A continuación se ha configurado el “Room setup” para lograr la mayor eficiencia y fiabilidad en las simulaciones. Para ello se ha medido previamente el tiempo de reverberación de la sala real, lo que ha permitido indicar un tiempo de respuesta al impulso general aproximado, necesario para que los datos obtenidos de los cálculos de tiempo de reverberación sean correctos. Este valor gira en torno a los 2 segundos.

También se ha medido la distancia máxima entre los posibles puntos fuente/receptor más alejados. Esta medida sirve para calcular el número de rayos necesario para asegurar un valor de tiempo de reverberación correcto. Para ello se utiliza la fórmula de rayo directo en receptor más alejado:  $d = \frac{N_{rayos}}{4\pi r^2}$  Siendo  $d$  la densidad por  $m^2$ , se ha escogido un valor de 2, el mínimo es  $1 \times m^2$ . La variable  $r$  corresponde a la mencionada distancia máxima; que tiene un valor de 34 m en esta sala. Despejando la fórmula:  $N_{rayos} = 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 34^2 = 29.053,45$ . Para manejar un valor redondo se ha utilizado la cifra de 30.000 rayos.

En la configuración de rayos tempranos se recomienda emplear el doble que en los directos. Por ello se han empleado 60.000 rayos.

El resto de parámetros generales y específicos del “Room setup” se han considerado buenos para el estudio de esta sala. Máximo orden de reflexión 2000, resolución de la respuesta al impulso 3 ms, mínima distancia a paredes 0,1 m, orden de transición de las reflexiones tempranas 2. De esta forma los datos quedan reflejados como puede observarse en la figura 4.1.

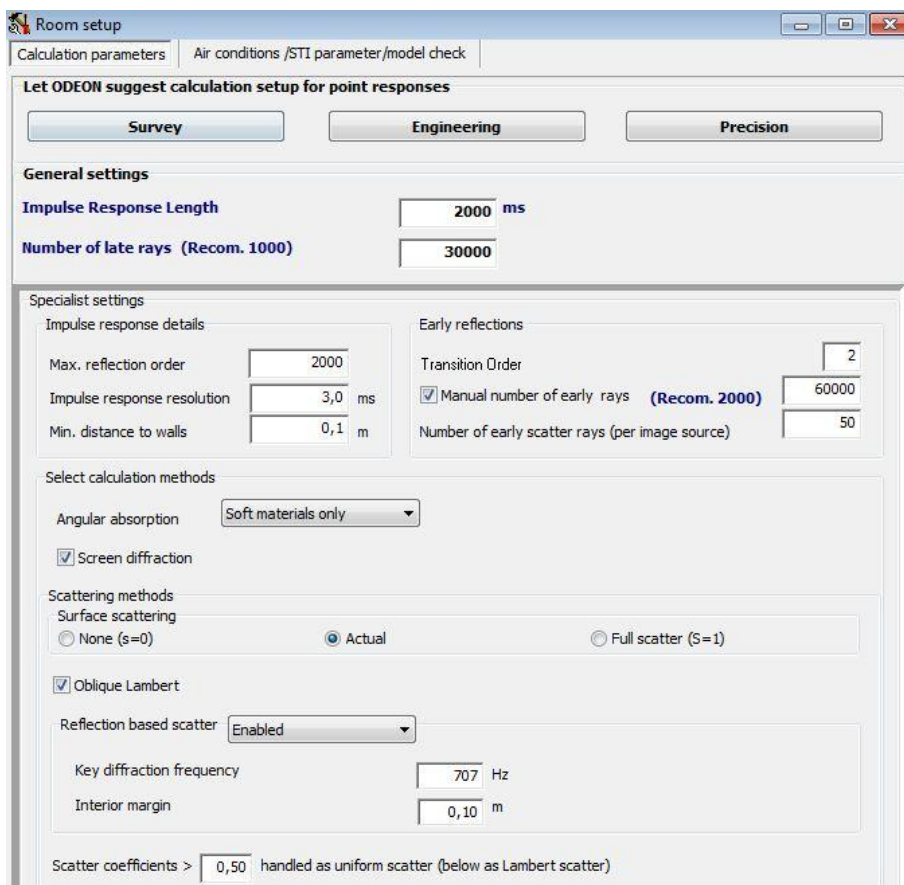


Figura 4.1. Ventana de la herramienta “Room setup”

El siguiente paso ha consistido en asignar materiales a las superficies de la sala. En este apartado ha sido de gran utilidad los nombres asignados a las capas según tipo de material como se especifica en el apartado correspondiente al trabajo realizado con SketchUp.

De este modo se han asignado inicialmente los coeficientes de absorción de los que se dispone. Estos son: Butacas, madera clara y resonadores. Para los demás materiales se ha consultado la base de datos de Odeon y el libro “Acústica Arquitectónica Aplicada” de Manuel Recuero López.

En la tabla 4.1 se muestran los coeficientes de absorción de los distintos materiales presentes en la sala. En el caso de las maderas es evidente que los valores son extremadamente bajos. Los motivos por los cuales ha sido necesario hacerlos tan bajos son variados. Una de las principales causas puede deberse al menor volumen de la sala simulada debido a la elevación de las superficies de las butacas. Otro motivo puede tener que ver con las condiciones del aire, la absorción del aire que propone Odeon parece ser superior a la real y se ha compensado con las maderas.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Madera clara	0,25	0,274	0,115	0,05	0,007	0,005	0,004	0,004
Madera blanca	0,05	0,05	0,03	0,02	0,003	0,002	0,001	0,001
Butacas vacías	0,3	0,35	0,65	0,8	0,8	0,62	0,4	0,2
Resonadores	0,4	0,45	0,8	0,95	0,95	0,7	0,35	0,1
Cristal	0,18	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02

Tabla 4.1.

La madera blanca, de la cual no se tiene información a priori, es una madera pintada y lacada, por tanto muy reflectante. Especialmente en frecuencias medias y graves responde a unos valores muy similares a los encontrados en madera barnizada.<sup>19</sup>

La madera clara, sin embargo, responde al perfil de las maderas contrachapadas con cámara de aire o separada alrededor de 50 mm de la pared.<sup>20</sup>

Tanto en el caso de las butacas vacías (Dynamobel) como en el de los resonadores (panel perforado “Onde Wave”) se han utilizado los coeficientes de absorción provistos por las respectivas empresas fabricantes. Sin embargo, ambos no dan información de las bandas de octava de 63 y 8000 Hz. Además ha sido necesario modificar los valores en altas frecuencias.

El cristal, al ser una superficie muy pequeña, se ha seleccionado un material de la base de datos de Odeon<sup>21</sup> y no se ha modificado su valor.

35

En la figura 4.2 puede apreciarse una gráfica comparativa de los coeficientes de absorción de todos los materiales.

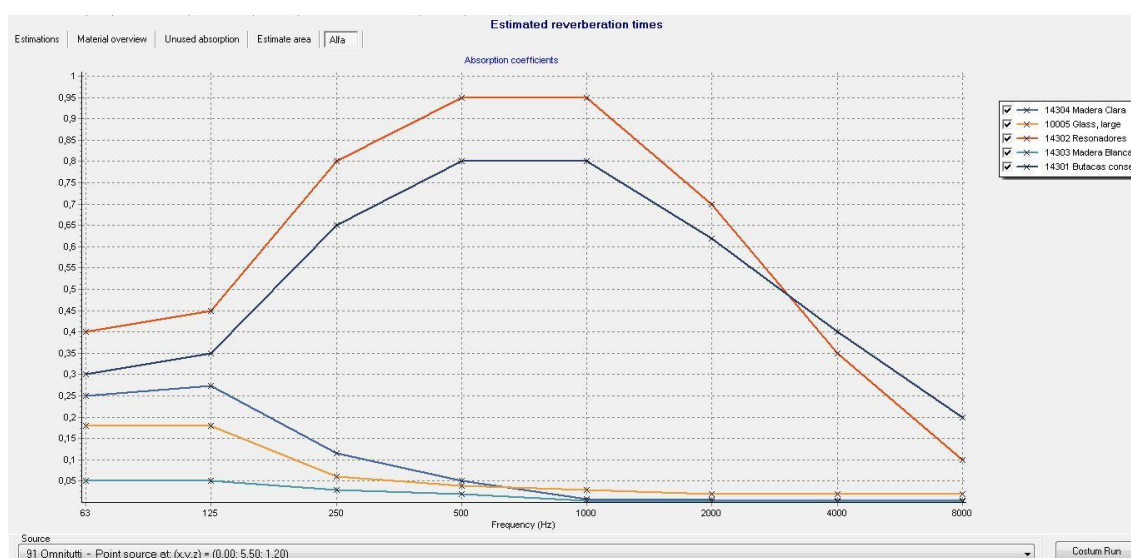


Figura 4.2. Coeficientes de absorción de los materiales en la sala ajustada

<sup>19</sup> “Acústica Arquitectónica Aplicada” (1999). M. Recuero (pág. 592)

<sup>20</sup> “Acústica Arquitectónica Aplicada” (1999). M. Recuero (pág. 595-596)

<sup>21</sup> Panel grande de cristal pesado (Mat. 10005). (Harris, 1991)

Una vez seleccionados los materiales se ha procedido a colocar una fuente omnidireccional en medio del escenario y un receptor en la zona de audiencia.

Antes de proceder a la simulación se ha asignado un valor de difusión del sonido de 0,3 a las zonas de escaleras y un 0,7 a la zona de audiencia. Estos valores son considerados de forma estándar como los más adecuados para estas zonas.

A continuación se ha ejecutado la estimación global de tiempo de reverberación "Global RT". Como es de esperar, los datos han sido muy distintos de los medidos en la sala real. Tras la primera prueba se ha ido ajustando la sala, buscando modificar ligeramente valores en los coeficientes de absorción. Lógicamente se ha permitido mayor margen de cambio en aquellos materiales de los que no se dispone información específica. Sin embargo, en materiales de los que sí se dispone de información del fabricante, se considera que los valores proporcionados pueden haber sido realizados en condiciones concretas de laboratorio y que en la sala den unos valores ligeramente distintos, por este motivo, ha sido necesario alterar también valores de los coeficientes de absorción de estos materiales tratando de no superar el umbral de lo perceptible.

Tras varias pruebas se han alcanzado unos valores satisfactorios. En la tabla 4.2 puede apreciarse una comparación de los resultados promediados de la medición in situ de la sala real y los datos obtenidos de la sala simulada. Además se incluye el valor de JND (Just Noticeable Difference) en segundos y la diferencia entre la sala real y simulada y si supera o no este umbral que marca si la diferencia es perceptible o no.

36

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sala (T30, s)	1,60	1,55	1,78	1,79	2,04	2,38	2,53	1,94
JND (s)	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,12	0,13	0,10
Ajuste (T30, s)	1,59	1,53	1,74	1,76	1,97	2,32	2,38	1,33
Diferencia (s)	0,01	0,02	0,04	0,03	0,07	0,06	0,15	0,61
Supera 1 JND	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SÍ	SÍ

Tabla 4.2. Comparación del T30 sala real con sala ajustada

Como puede observarse en la tabla 4.2, el resultado final supone unas diferencias por debajo de 1 JND, lo que significa que las diferencias son tan pequeñas que no son perceptibles, psicoacústicamente hablando, entre los valores de la sala real y la sala simulada. Hay una excepción en las bandas de octava de 4000 Hz y 8000 Hz en las cuales sí se supera el JND. En el caso de 4000 Hz es una diferencia de solamente 0,02 segundos, en el caso de la banda de 8000 Hz esta diferencia es mayor. Estos valores son difíciles de controlar y poco fiables, tanto en las medidas reales como en las simulaciones. En el caso de las frecuencias más altas, la absorción del aire que propone Odeon es muy alta y supone prácticamente el total de la absorción por lo que es un valor que no puede ser modificado únicamente ajustando coeficientes de absorción de los materiales de la sala (figura 4.3). Por este motivo se ha dado por bueno este ajuste.

En la figura 4.3 se muestra la cantidad de absorción que ha realizado cada material en función a la superficie que ha estado en contacto con el sonido y a sus características por

bandas de octava. En esta gráfica se descubre cómo se dispara la absorción del aire en la banda de 8 kHz.

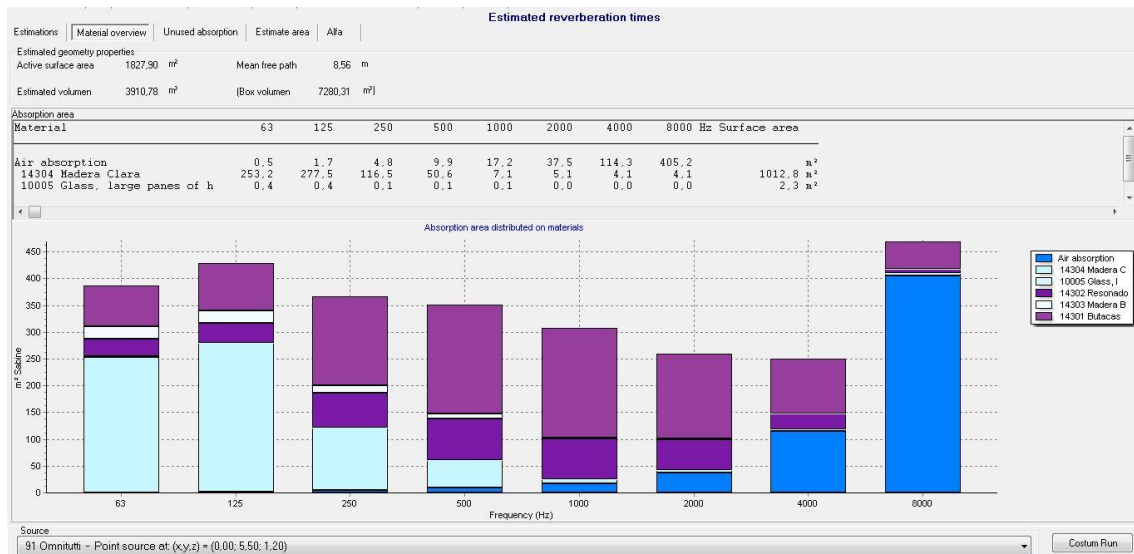


Figura 4.3. Absorción total ejercida por cada material

En la figura 4.4 están reflejadas las curvas de energía de la sala.

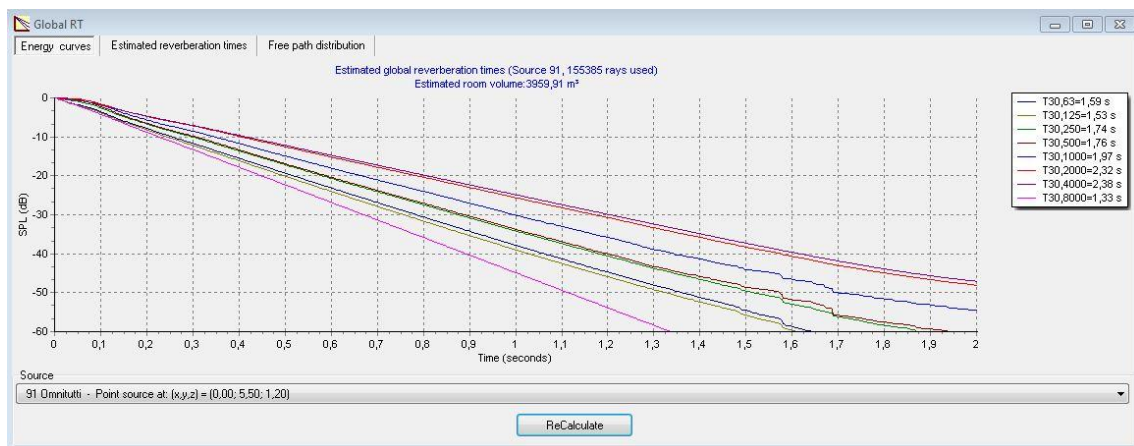


Figura 4.4. Curvas de energía

En la figura 4.5 está representada la gráfica de distribución del camino libre medio.

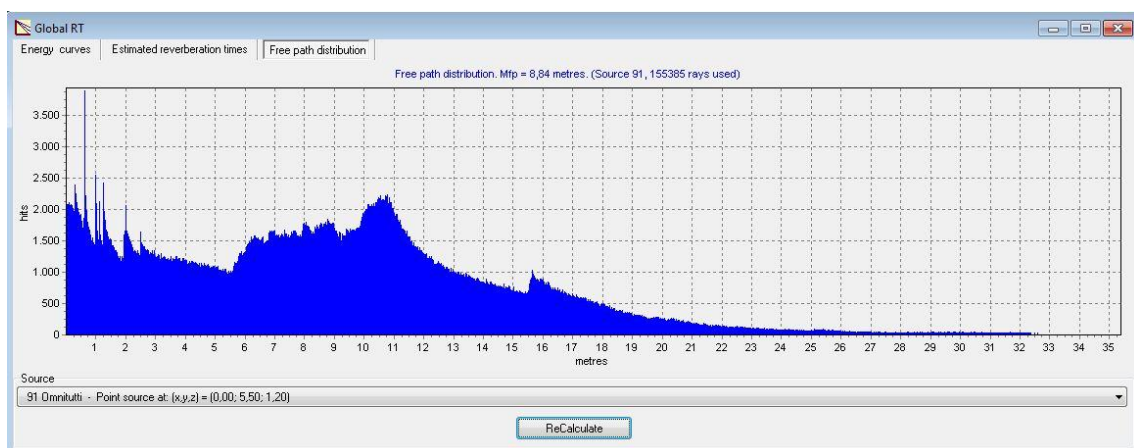


Figura 4.5. Distribución del camino libre medio

Una vez se ha concluido el ajuste se ha de tener en cuenta que los parámetros acústicos han sido medidos en la sala vacía así que, para hacer una auralización más realista se ha procedido a modificar los coeficientes de absorción que se verán alterados en una sala llena, ya que, la auralización pretende simular cómo se oiría en la sala en un concierto, con músicos sobre el escenario y personas en las butacas.

En concreto se han modificado dos elementos. Primero se ha seleccionado un área que cubre la mayor parte del escenario y se ha asignado a esa zona un coeficiente de absorción propio de una orquesta y modificado el coeficiente de difusión a 0,7, el mismo que la zona de asientos. La otra superficie modificada es la que corresponde a la audiencia. Gracias a los datos aportados por la empresa proveedora de los asientos se ha tenido disponible esta información.

En la tabla 4.3 se muestran los nuevos coeficientes de absorción para la sala llena.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Butacas llenas	0,3	0,5	0,75	0,85	0,85	0,9	0,85	0,8
Orquesta	0,25	0,27	0,54	0,67	0,9	0,8	0,8	0,7

Tabla 4.3. Nuevos coeficientes de absorción sala llena

Las butacas llenas han sido modificadas con el mismo criterio que las butacas vacías. Para la realización de la orquesta se han utilizado dos fuentes diferentes como referencia.

La primera referencia es la que se refiere a la absorción de una persona con un instrumento musical<sup>22</sup> aunque esta tiene carencias, ya que, no todos los instrumentos tienen las mismas características en cuanto a absorción acústica y que no da información del área que ocupa este músico.

La segunda referencia y más valorada es la que se encuentra en Odeon<sup>23</sup> pero, siguiendo los criterios anteriormente mencionados, se han reducido ligeramente algunos coeficientes de absorción, considerando el resultado más realista.

A consecuencia de este cambio, los resultados de los parámetros acústicos son diferentes. Los nuevos valores de la estimación global del T30 se pueden apreciar en la tabla 4.4.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sala llena (T30, s)	1,56	1,39	1,43	1,42	1,48	1,48	1,35	0,88

Tabla 4.4. Estimación global T30 sala llena

Como es previsible, el tiempo de reverberación ha disminuido, especialmente en las altas frecuencias, ya que el cuerpo humano es absorbente en general y en altas frecuencias en especial. Aparentemente esto sugiere que una sala, originalmente brillante, al llenarse se equilibra.

<sup>22</sup> "Acústica Arquitectónica Aplicada" (1999). M. Recuero (pág. 633)

<sup>23</sup> Orquesta con instrumentos sobre podio; 1,5 m<sup>2</sup> por persona (Mat. 11000). (Bobran, 1973)



La figura 4.6 refleja la nueva distribución de la absorción en función del material y la superficie que abarca.

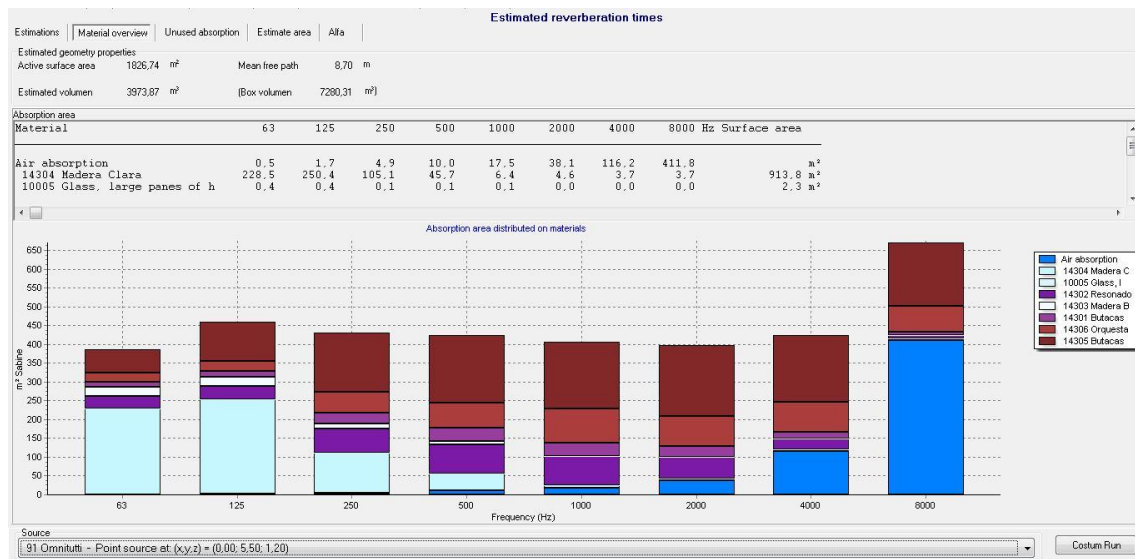


Figura 4.6. Distribución de la absorción

Las nuevas curvas de energía también se ven alteradas (figura 4.7).

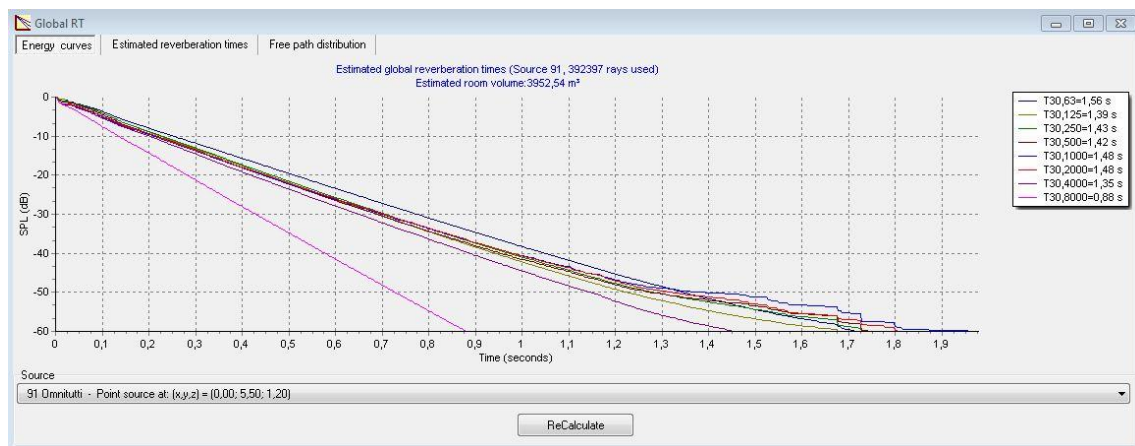


Figura 4.7. Curvas de energía en la sala llena



En la figura 4.8 puede apreciarse la gráfica que representa todos los materiales y sus coeficientes de absorción en bandas de octava.

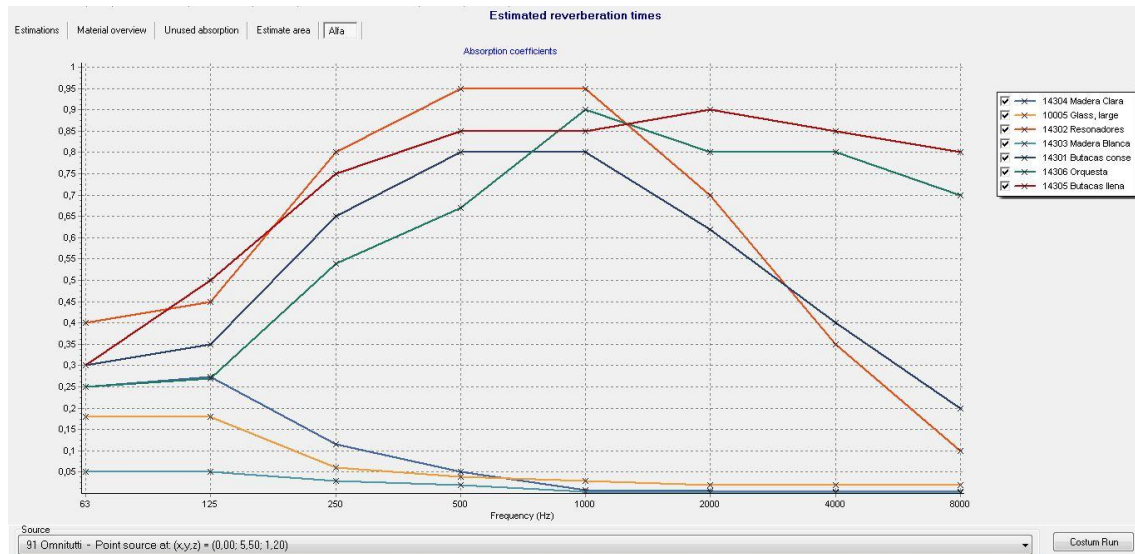


Figura 4.8. Nuevos coeficientes de absorción de los materiales

Esta configuración de los materiales ha sido la empleada en todas las auralizaciones realizadas a excepción del caso particular en el cual se ha recreado una sala ficticia muy absorbente cuyo objetivo, como se ha mencionado, es comprobar si el tiempo de reverberación influye notablemente en la capacidad de discernir diferencias en el sonido.

Para crear esta sala se ha buscado un nivel de absorción alto pero que no genere una situación excesivamente irreal. Aprovechando la misma geometría que la sala original se ha cambiado el material a todas las superficies por uno ideal que absorbe al 70% ( $\alpha = 0,7$ ) en todas las frecuencias por igual.

El resultado es una sala altamente absorbente. En la tabla 4.5 pueden verse los nuevos valores del T30 por bandas de octava.

Frec. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Sala abs. (T30, s)	0,35	0,43	0,40	0,38	0,36	0,36	0,34	0,29

Tabla 4.5. Estimación global del T30 en la sala absorbente

Global RT

Energy curves | Estimated reverberation times | Free path distribution

Estimated global reverberation times (Source 91, 434467 rays used)  
Estimated room volume: 3953.63 m<sup>3</sup>

SPL (dB)

Time (seconds)

Source  
91 Omnitutti - Point source at: (x,y,z) = (0,00, 5,50, 1,20)

ReCalculate

El resto de gráficos no tienen interés, ya que solamente es un material de absorción el que actúa junto con el aire.

Como se ha mencionado en la introducción de esta memoria, una de las versiones de auralización que se pretende es la ejecución de la técnica multi-canal. Esta técnica contempla la directividad de la fuente.

El Grupo CLF (Formato de Altavoz común) se formó con el propósito de definir y mantener un único formato, un formato de archivo abierto que los fabricantes de altavoces pueden utilizar para suministrar datos a los usuarios finales en el sonido profesional y la comunidad acústica. Conforme la mayoría de sistemas de sonido y acústica se han ido desarrollando, el número de formatos utilizados para los datos de altavoz ha aumentado. El Grupo CLF ha acordado apoyar un formato común, haciendo que los datos de altavoces sean más fáciles de suministrar y utilizar.

Su objetivo es hacer que el rendimiento del altavoz y datos polares estén disponibles en un formato abierto y seguro.

CLF se define en dos partes, un formato basado en texto usado para la entrada y edición de datos, y un formato binario para la distribución de datos. El Grupo CLF está haciendo una serie de herramientas para la edición de datos, conversión de texto a formato binario de distribución y visualización de datos binarios.

CLF es un formato abierto. El Grupo controla el formato CLF pero la definición está disponible gratuitamente. Las herramientas para la creación de archivos de formato binario están disponibles bajo petición. Las herramientas incluyen un identificador único de modo que los datos binarios son siempre etiquetados con su fuente. Junto con otras características de seguridad incluidas en el formato binario, el usuario final conoce el origen de los datos y puede estar seguro de que no han sido alterados.<sup>24</sup>

Existen dos formatos dentro del CLF. CF1, que almacena datos por bandas de octava, y CF2, que almacena datos por tercios de octava. Los datos que se han utilizado están en formato CF1.

Los datos que se han utilizado requieren de autorización para su uso en formato CLF y los archivos libres están en formato de texto (.txt). Por este motivo se ha optado por modificar los archivos manualmente y convertirlos a un formato propio de Odeon, .So8. Esta conversión se realiza con la herramienta de Odeon "Convert ASCII input into So8".

Para ello se ha utilizado el editor de texto con las normas de programación que indica Odeon para crear los archivos.

La primera línea no comentada indica el tipo de datos que definen la directividad. Hay tres: Polar, simétrico y completo.

POLAR: Solamente se indican los valores verticales y horizontales.

SYMMETRIC: Se utiliza para fuentes simétricas, requiriendo menos datos.

FULL: Completo. Se emplea para fuentes más complejas cuando los datos de directividad son cada 10° de azimuth y cada 10° de elevación. Este es el tipo de datos que se ha empleado en este proyecto.

La segunda línea no comentada hace referencia al tipo de sonido que va a producir la fuente. Hay dos tipos: Natural verdadero y natural falso.

NATURAL TRUE: Cuando los datos representan un sonido natural como el sonido de un instrumento musical o una persona hablando o cantando. Es la configuración que corresponde a los archivos empleados en este proyecto.

NATURAL FALSE: Cuando los datos simulan la directividad de un altavoz o fuente artificial de sonido.

Cada una de las siguientes líneas del archivo debe contener los niveles de presión sonora (SPL) en dB para una elevación completa de 180° desde el eje frontal al posterior. La resolución debe ser de 10°, con lo que cada línea debe contener 19 valores (10°, 20°, ..., 180°).

Las líneas de comentarios deben comenzar con dos puntos (:), punto y coma (;) o asterisco (\*).

---

<sup>24</sup> <http://www.clfgroup.org>

En la configuración empleada (FULL) hay 36 líneas de datos por cada frecuencia de banda de octava. Las 36 primeras líneas corresponden a la frecuencia de 63 Hz, las 36 siguientes a la de 125 Hz y así hasta la de 8 kHz.

La primera línea corresponde la trama vertical superior 0°. La décima línea corresponde a la trama horizontal izquierda 90°. La decimonovena línea corresponde a la trama inferior vertical 180°. La vigesimosexta línea corresponde a la trama horizontal izquierda 270°.

Los archivos en formato CLF no requieren contener información de todas las bandas de octava por lo que algunos de los archivos no contienen estos datos debido a que esos instrumentos en cuestión no producen sonido real en esas frecuencias. Sin embargo, el formato So8 no permite omitir esta información. Por este motivo se ha escrito como valor estándar en estos casos un nivel de presión sonora de 9,9 dB, generando un globo omnidireccional para estas bandas de octava que puede suponer una forma de contemplar valores espectrales que no pertenecen al tono pero sí afectar al timbre del instrumento.

En la figura 4.10 se representan los globos de directividad de todos los instrumentos a excepción de la batería de timbales que, al ser un conjunto de instrumentos, se ha optado por emplear una fuente omnidireccional para representarlos. Todos estos globos muestran la directividad de cada instrumento en la banda de 1000 Hz, con un rango máximo de 40 dB, azimuth 30° y elevación 30°.

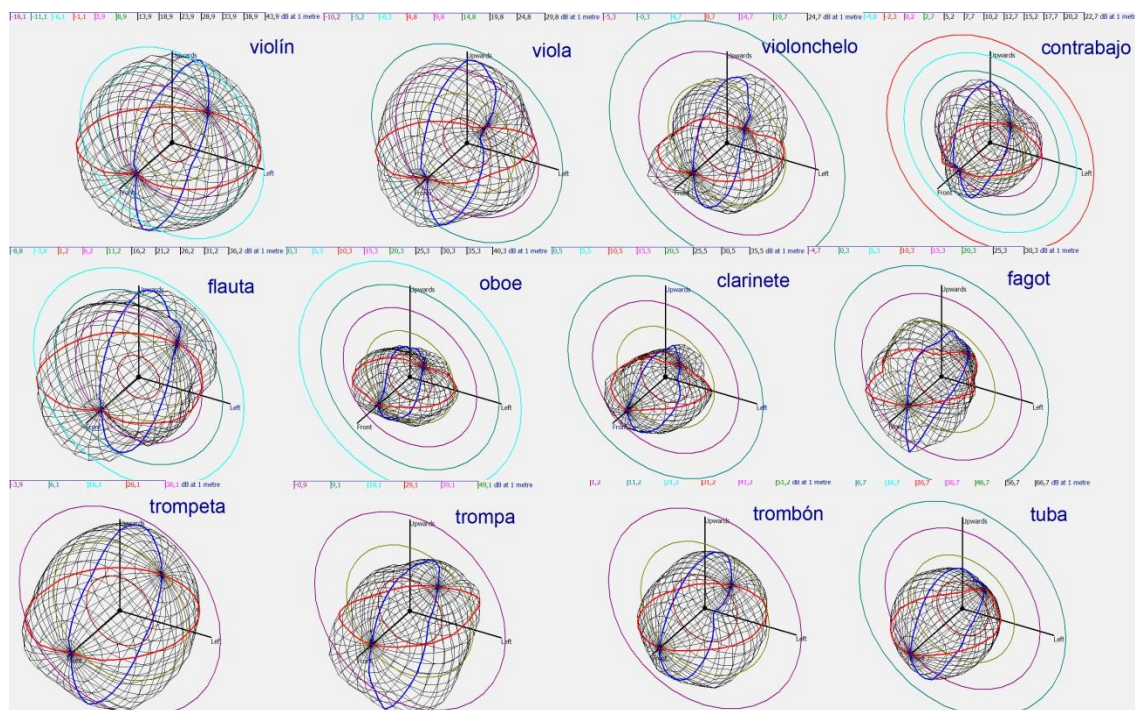


Figura 4.10. Globos de directividad de los instrumentos

Un dato importante a tener en cuenta es que todos estos globos de directividad están normalizados en una configuración cuyo frente es la salida principal de sonido de cada instrumento lo que implica que se ha de configurar consecuentemente cada fuente con su correspondiente sentido direccional, acorde a la postura del músico.

### 4.3. Fase 3: Colocación de fuentes y receptores

Como ya se ha mencionado en apartados previos, existen hasta tres configuraciones de fuente y dos de receptores. Las tres configuraciones de fuente son: Una fuente por cada músico, una fuente por cada sección de instrumentos y una fuente omnidireccional que representa a toda la orquesta. Las configuraciones de receptor son: Un receptor en posición de público y un receptor en la posición del director de orquesta.

#### 4.3.1. Configuraciones de fuente:

##### Una fuente por músico

En el pasaje orquestal empleado para este trabajo y con el modelo de orquesta escogido hay un total de 87 músicos sobre el escenario. 16 violines primeros, 14 violines segundos, 12 violas, 10 violonchelos, 8 contrabajos, 2 flautas, 3 oboes, 3 clarinetes, 3 fagots, 3 trompetas, 3 trombones, 8 trompas, 1 tuba y 1 batería de timbales.

Esto significa que se han colocado sobre el escenario un total de 87 fuentes. La situación de las mismas sobre el escenario se especifica en el apartado de esta memoria que habla sobre la orquesta.

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se ve el aspecto final de este modelo desde diferentes ángulos. Nótese que existe un espacio en la zona del fondo a la izquierda, visto desde el público. Este espacio corresponde a músicos que no tocan en este pasaje de la obra como es el caso de las arpas y varios percusionistas.

44

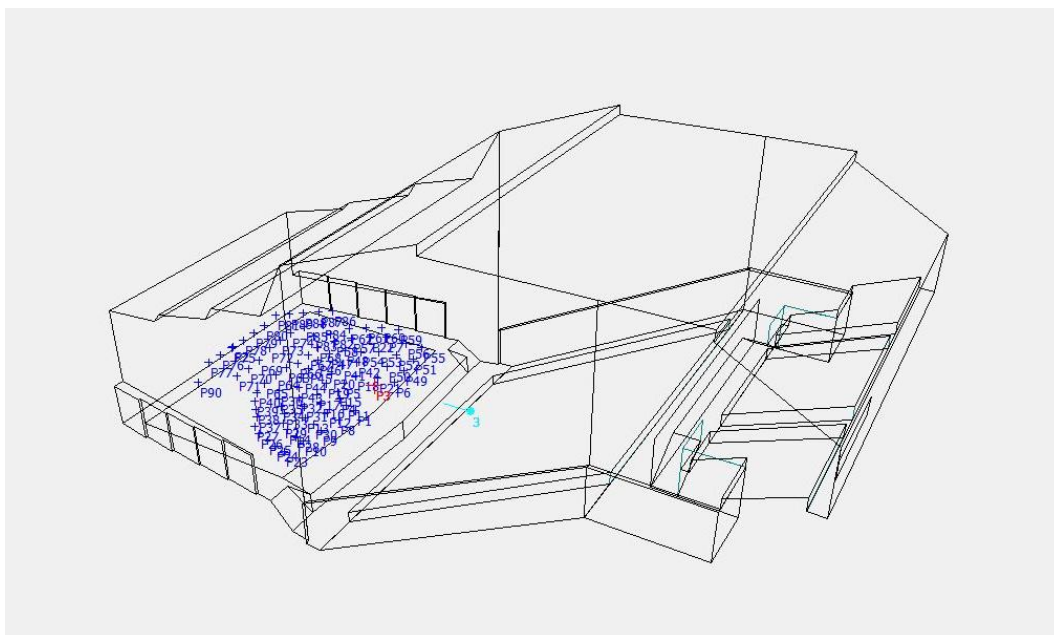


Figura 4.11. Vista general



El punto rojo “P3” indica la posición del director, que es el punto de referencia hacia el que miran todos los músicos y receptor. El punto “3”, de color cian, indica la posición del receptor en la zona de audiencia. El punto “P2”, en el centro del fondo del escenario, corresponde al puntero del director, es decir, cuando el director actúe como receptor, esta será su referencia.

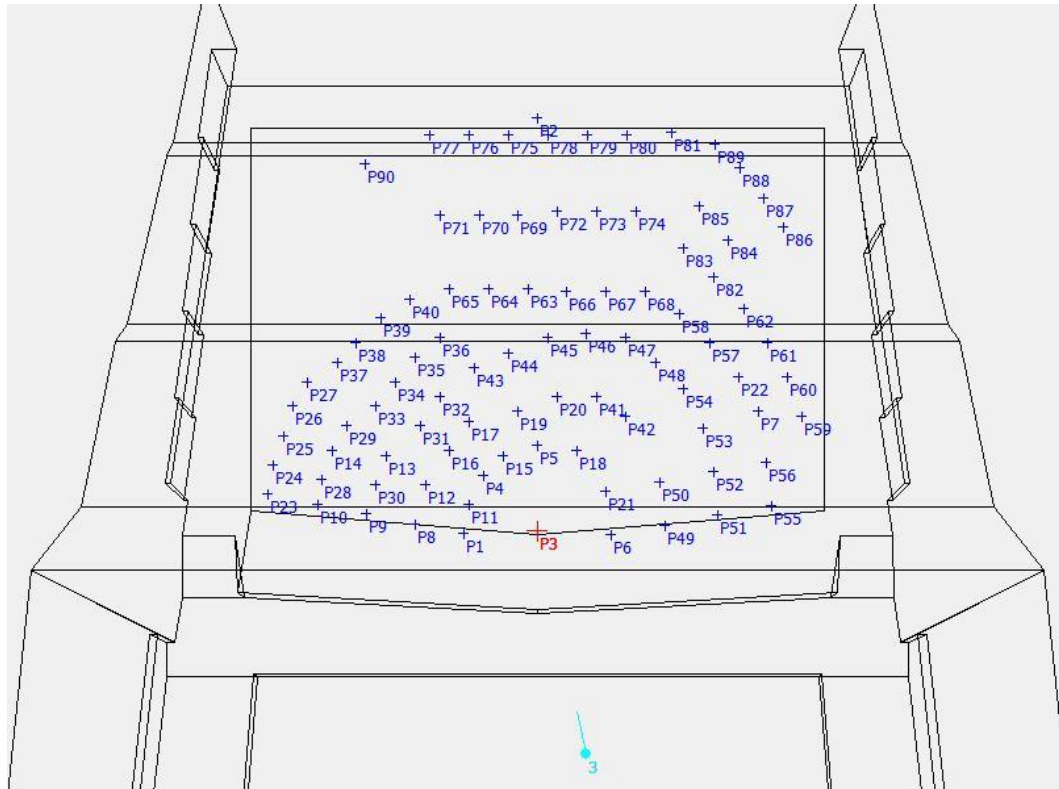


Figura 4.12. Planta

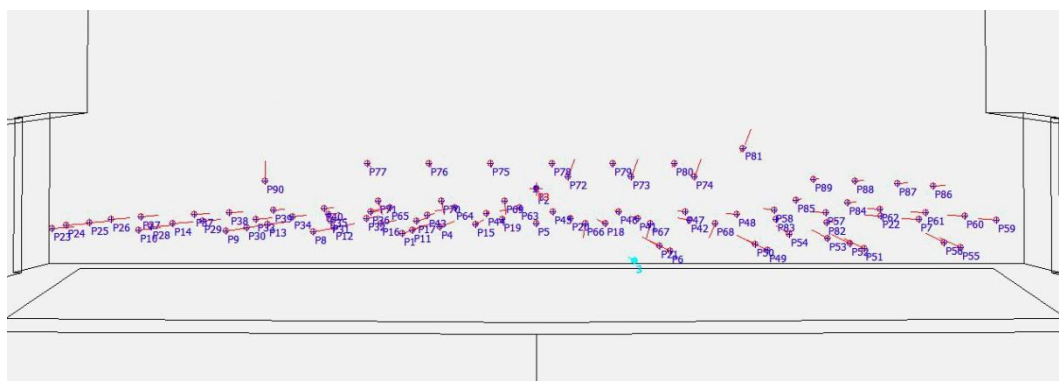


Figura 4.13. Vista frontal

A continuación se muestra una lista de los instrumentos asignados a cada punto:

- Sección de cuerda: Violines primeros: P1, P8 a P14, P23 a P30. Violines segundos: P4, P15 a P17, P31 a P40. Violas: P5, P18 a P21, P41 a P48. Violonchelos: P6, P21, P49 a P56. Contrabajos: P7, P22, P57 a P62.
- Sección de viento-madera: Flautas: P63, P64 (off), P65. Oboes: P66 a P68. Clarinetes: P69 a P71. Fagots: P72 a P73.
- Sección de viento-metal: Trompetas: P74 a P76. Trombones: P78 a P80. Tuba: P81. Trompas: P82 a P89.
- Sección de percusión: Timbales: P90

La figura 4.13 representa una vista frontal en la que se aprecian varios niveles en el eje vertical (z). Se han establecido tres alturas diferentes que simulan tarimas que se colocan habitualmente en los escenarios para mejorar tanto la claridad musical como la visibilidad entre músicos y director y del público hacia los músicos.

El primer nivel es el propio suelo del escenario. El segundo nivel es en el que se colocan clarinetes, fagots y cuatro trompas. En el nivel superior se colocan trompetas, trombones, tuba, las otras cuatro trompas y los timbales.

Según escenarios, orquestas u obras a interpretar, estas tarimas varían en número, altura y músicos que se sitúan sobre ellas. En este caso su altura es de 0,2 m por cada escalón.

46

Además de estas diferencias, en el eje z, se ha contemplado el tamaño y la forma de cada instrumento y la postura con la que el intérprete ejecuta el sonido. Por este motivo se dan más diferencias en el eje vertical, además de los tres niveles mencionados. Por ejemplo, la tuba es un instrumento de grandes proporciones y la fuente de su sonido está por encima de la cabeza del músico, su altura es superior a otras. Los violines y violas se colocan sobre el hombro izquierdo del ejecutante mientras que el violonchelo se coloca apoyado sobre el suelo.

En el estudio de la directividad se ha advertido de la característica de los globos que su frente no es el frente del músico sino de la salida de sonido de su instrumento. Por ello, se han modificado valores de rotación y elevación en el sentido de las fuentes para ajustarlo a las características del instrumento al que simulan.

Así, los violonchelos se encuentran posicionados de frente al director y con una elevación, o inclinación vertical, de 25°; clarinetes y oboes -40°, trompetas y trombones -10°.

Además de la elevación, algunos instrumentos ven modificado su azimuth. Fagots: azimuth a 130° y elevación 60°. Flautas: azimuth a 0° (hacia la izquierda desde el punto de vista del público) y elevación -10°. Trompas: azimuth a -120° y elevación 0°. Tuba: azimuth a 170° y elevación 70°.

Para el resto de instrumentos, tanto el azimuth como la elevación, dependen de su posición. Apuntan directamente a la posición de director en sus ejes x, y, z.

En la figura 4.14 se aprecian estas características en la direccionalidad de las fuentes.

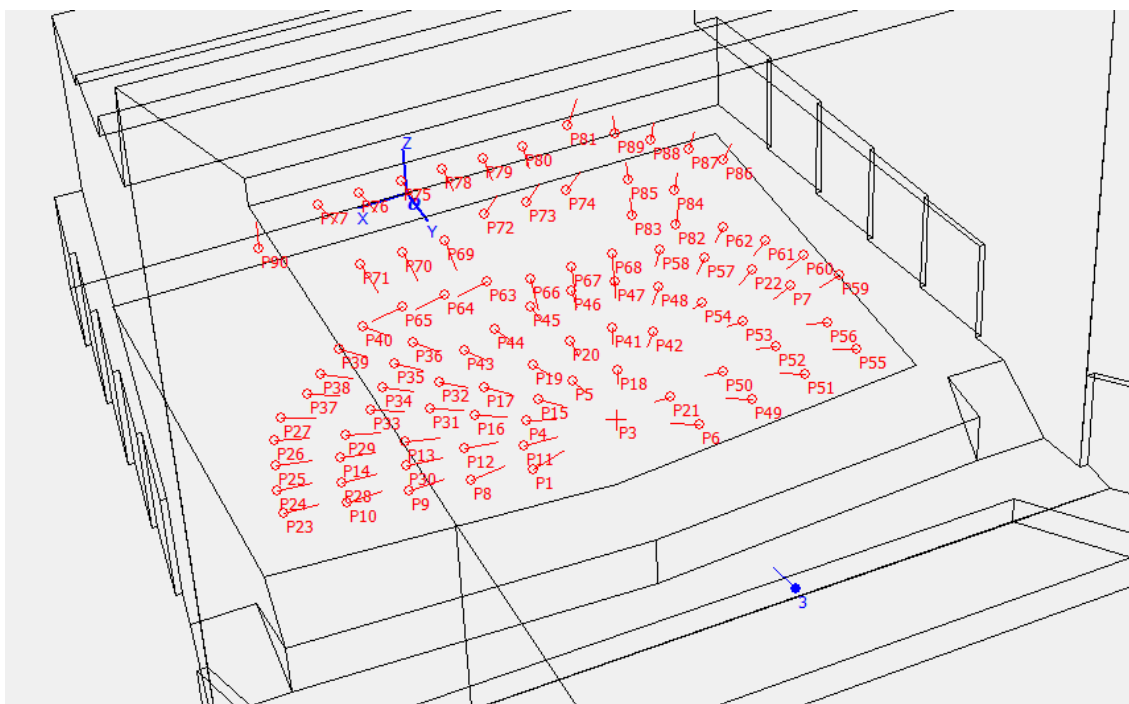


Figura 4.14. Detalle de las características en la direccionalidad de las fuentes

#### Una fuente por sección instrumental:

47

El siguiente modelo responde a la agrupación de las fuentes del anterior modelo según secciones de instrumentos. Estas secciones se establecen según el grado de afinidad tímbrica. En total se han establecido siete secciones: Violines primeros, violines segundos, violas, violonchelos, contrabajos, viento-madera, viento-metal (junto con los timbales, debido a su proximidad en el escenario).

Para agrupar correctamente cada conjunto de sonidos ha sido necesario un tratamiento previo explicado en la sección “Configuración de los archivos de audio”.

Estas siete fuentes se han situado en el centro de cada área correspondiente a cada sección de instrumentos. Las fuentes, al representar un conjunto de instrumentos, son omnidireccionales.

En la figura 4.15 puede verse el resultado final de esta configuración de fuentes. “P92” representa a la sección de violines primeros, “P93” representa a la sección de violines segundos, “P94” violas, “P95” violonchelos, “P96” contrabajos, “P97” viento-madera, “P98” viento-metal y timbales.



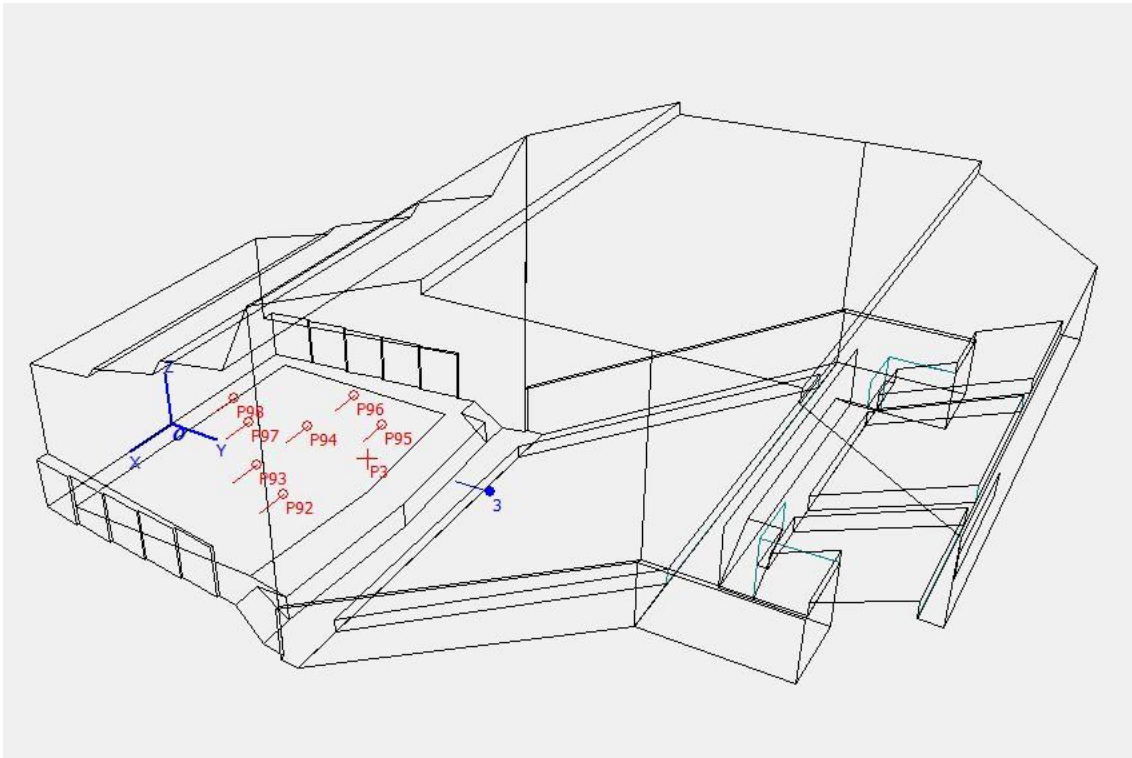


Figura 4.15. Detalle de la distribución de las fuentes en configuración secciones

### Una fuente omnidireccional:

La tercera configuración de fuente realizada es la que representa a toda la orquesta en una sola fuente puntual.

Al igual que para la configuración de secciones, ha sido necesario un tratamiento previo para juntar todas las pistas de audio en una sola equilibrada. Para más información de este proceso puede consultarse en la sección “Configuración de los archivos de audio”.

La fuente ha sido colocada en el centro del escenario y es omnidireccional.

La figura 4.16 permite ver el resultado final. El punto “P91” representa la fuente.

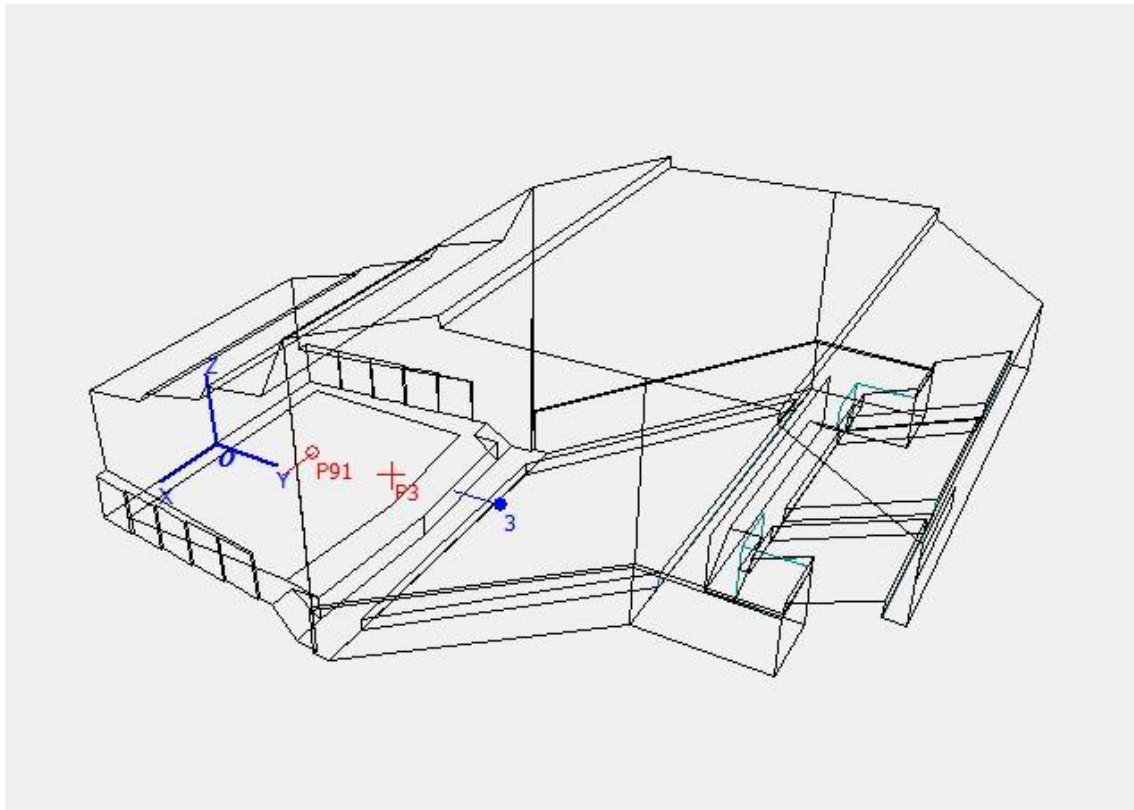


Figura 4.16. Detalle configuración fuente omnidireccional

### 9.3.2. Colocación de receptores:

Como se muestra en cualquiera de las figuras de colocación de fuentes, un receptor representa al público. Su posición simula una persona sentada en una de las butacas de las filas más cercanas al escenario y se encuentra ligeramente desplazado hacia la derecha, visto desde el público, respecto al eje central. Es el punto 3.

El receptor del director es el receptor número 1, sin embargo, en las figuras previas no aparece representada. En su lugar aparece su equivalente como fuente, que sirve de referencia para músicos y receptor 3 hacia donde miran. Este receptor pretende emular a un director de pie frente a los músicos y mirando hacia el fondo del escenario.

## 4.4. Fase 4: Auralizaciones

Este apartado explica en concreto la principal labor de este proyecto, junto con la evaluación de los test psicoacústicos, que es la ejecución de la técnica de auralización.

Lo primero que se ha hecho es comprobar el set up de las auralizaciones en Odeon. La configuración predeterminada se ha considerado correcta para la realización de este proyecto.

En la figura 4.17 se muestra cómo es esta configuración predeterminada en “Auralisation setup”.

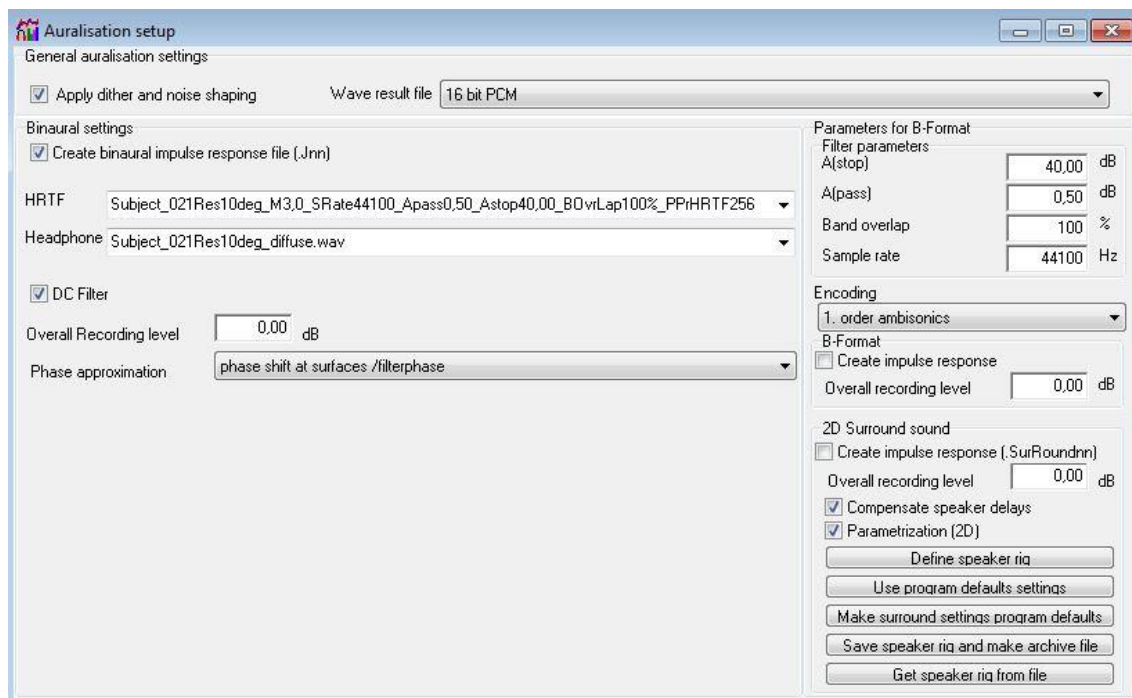


Figura 4.17. Ventana “Auralisation setup”

El siguiente paso ha sido asignar a cada fuente un trabajo, un receptor y hacia donde apunta ese receptor con la función “JobList” de Odeon en modo binaural, la pantalla “Point response calculation” (figura 4.18).

En la figura 4.18 aparece representada una parte de la lista para la configuración de una fuente por música y receptor 3 (“3 R1”). En la descripción del trabajo se ha asignado la fuente activa correspondiente con el mismo nombre. Para la configuración del receptor en la posición de director se ha asignado en la casilla “Single point response receiver” el receptor “1 director” y en la casilla “Receiver pointing towards source” la fuente inactiva “2 puntero director”.

El mismo proceso se ha repetido para las otras dos configuraciones de orquesta, representadas como otros puntos y otros trabajos.

JobList - Binaural mode (Headphone = Subject\_021Res10deg\_diffuse.wav)

Active sources for the selected job

☐ 1 Violin1a - Point source at: (x,y,z) = (0,0,1) ☐ 3 director - Point source at: (x,y,z) = (0,0,1) ☐ 5 viola a - Point source at: (x,y,z) = (0,0,1) ☐ 7 contr

☐ 2 puntero director - Point source at: (x,y,z) = (0,0,1) ☐ 4 violin 2a - Point source at: (x,y,z) = (0,0,1) ☐ 6 cello a - Point source at: (x,y,z) = (-1,0,1) ☐ 8 violin

Job	Job description	Receiver pointing towards source	Grid	Multi	Single point response receiver
1	todos	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
2	violin1a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
3	violin2a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
4	viola a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
5	cello a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
6	contrabajo a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
7	violin 1b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
8	violin 1c	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
9	violin 1d	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
10	violin 1e	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
11	violin 1f	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
12	violin 1g	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
13	violin 1h	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
14	violin 2b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
15	violin 2c	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
16	violin 2d	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
17	viola b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
18	viola c	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
19	viola d	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
20	cello b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
21	contrabajo b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
22	violin 11a	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
23	violin 11b	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
24	violin 11c	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)
25	violin 11d	3 director - Point source at: (x,y,z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	3 R1 (x,y,z) = (-1,00; 14,00; 1,00)

Figura 4.18. Ventana “Point response calculation” del “Joblist”

Tras la asignación de trabajos se ha procedido a configurar la otra parte de la función “JobList” que es la llamada “Auralisation display”.

Esta pantalla se subdivide en tres subpantallas. En la primera subpantalla, “Convolve Binaural RIR with Signal file”, se indica la subruta donde se alojan las señales previamente tratadas y se asigna la señal que corresponde a cada número de trabajo. También en este subapartado se comprueba, ejecutando el trabajo, el nivel de salida y se asigna un nivel de grabación. Tras varias pruebas se ha encontrado óptimo un valor de 36 dB de nivel de grabación para todas las fuentes que representan un solo instrumento musical. El motivo de asignar un mismo valor para todas las fuentes es conservar el equilibrio de amplitud de cada fuente en conjunto. Cada trabajo recibe entonces un número de convolución.

La segunda subpantalla, “Convolve in mix. no. 1”, sirve para preparar las convoluciones para la posterior mezcla. Se asigna el número de convolución y se le puede añadir amplitud, nivel de mezcla, y aplicar un desfase (delay).

Por último, la subpantalla central, “Mix convolved wave results into one wave file”. Es la mezcla final. Se combinan las convoluciones de diferentes señales en una sola. Esta genera las señales de audio definitivas que se han utilizado posteriormente en los test subjetivos. Se puede realizar cualquier tipo de mezcla. Se han hecho pruebas por secciones diferenciadas de cuerdas y vientos con percusión y la versión de la orquesta completa, la llamada “tutti”. Como información adicional da el nivel máximo de salida, que debe estar por debajo de cero, si está por encima indica que la mezcla ha saturado.

La figura 4.19 muestra esta pantalla en la configuración de una fuente por músico.

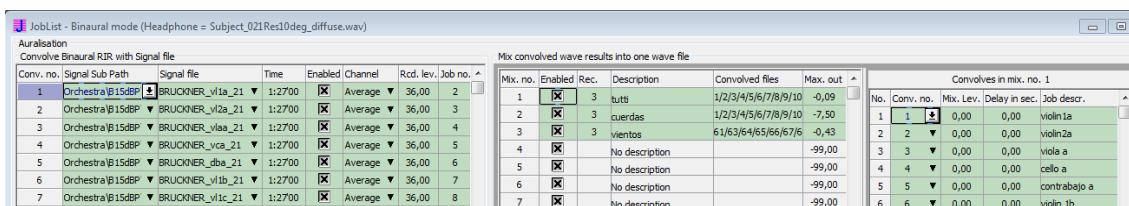


Figura 4.19. Ventana “Auralisation display” del “Joblist”

La figura 4.20 muestra las subpantallas 1 y 3 para el caso de las secciones y una fuente omnidireccional. El nivel de grabación de la convolución del audio para la fuente omnidireccional es de 46 dB y los de las secciones 42 dB.

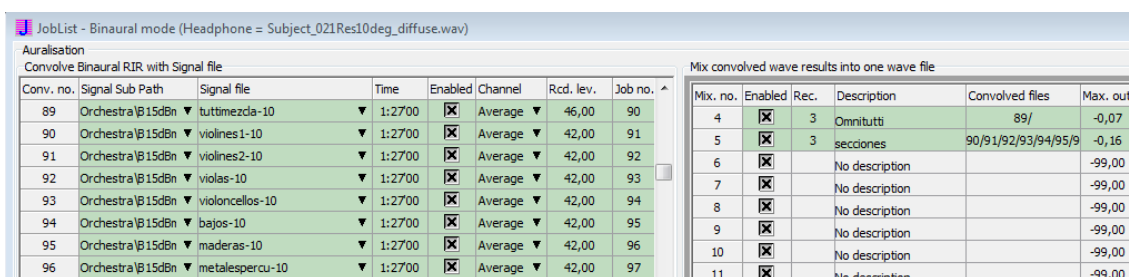


Figura 4.20. Detalle “Auralisation display” para configuraciones de secciones y omnidireccional

52

Este proceso se ha repetido de la misma manera con los materiales de la sala ajustada y los materiales de la sala absorbente. En total se han generado en total 12 archivos de audio:

1. Tutti (fuente por músico) en sala ajustada, receptor público.
2. Tutti en sala ajustada, receptor director.
3. Tutti en sala absorbente, receptor público.
4. Tutti en sala absorbente, receptor director.
5. Secciones en sala ajustada, receptor público.
6. Secciones en sala ajustada, receptor director.
7. Secciones en sala absorbente, receptor público.
8. Secciones en sala absorbente, receptor director.
9. Omnidireccional en sala ajustada, receptor público.
10. Omnidireccional en sala ajustada, receptor director.
11. Omnidireccional en sala absorbente, receptor público.
12. Omnidireccional en sala absorbente, receptor director.

Estos archivos de audio se encuentran en formato wav (Waveform Audio Format) en el DVD de este PFC. Incluye también una simulación de la sala ajustada configurada con todas las fuentes.

## 5. CONFIGURACIÓN DE LOS ARCHIVOS DE AUDIO

Para configurar los archivos de audio se ha utilizado el programa de software de tratamiento de audio Adobe Audition CS 5.5.

El tratamiento de la señal ha requerido varias fases generales y otras específicas. La primera de las generales es un ajuste de amplitudes y la segunda un proceso de eliminación de ruido. Para trabajar los instrumentos por secciones y en grupo en una sola fuente ha sido necesario un tratamiento multipista.

### 5.1. Fase 1: Ajuste de amplitudes

Las grabaciones han sido realizadas en cámara anecoica de forma individualizada a cada intérprete. Por este motivo las amplitudes están desequilibradas en conjunto. En general, los instrumentos de cuerda tienen una amplitud escasa, mientras que los de viento-metal, excesiva. Sin embargo, existen casos aislados que han sido necesarios tratar de forma individualizada.

En la tabla 5.1 se desglosa la amplitud de pico original de cada señal, la amplitud añadida (amplificación) y el resultado final.

53

INTRUMENTOS	NOMBRE DEL ARCHIVO	AMPLITUD DE PICO	AMPLITUD	AMPLITUD DE PICO
CUERDAS	DE AUDIO (.wav)	ORIGINAL (dB)	AÑADIDA (dB)	FINAL (dB)
violín 1a	BRUCKNER_vl1a_21	-42,81	19	-23,83
violín 1b	BRUCKNER_vl1b_21	-45,55	21	-24,54
violín 1c	BRUCKNER_vl1c_21	-39,48	15	-24,49
violín 1d	BRUCKNER_vl1d_21	-40,37	16	-24,41
violín 1e	BRUCKNER_vl1e_21	-44,73	20	-24,89
violín 1f	BRUCKNER_vl1f_21	-39,81	15	-24,85
violín 1g	BRUCKNER_vl1g_21	-39,81	15	-24,87
violín 1h	BRUCKNER_vl1h_21	-44,73	20	-24,83
violín 2 a	BRUCKNER_vl2a_21	-39,94	15,5	-24,48
violín 2 b	BRUCKNER_vl2b_21	-40,54	16	-24,60
violín 2 c	BRUCKNER_vl2c_21	-38,14	14	-24,19
violín 2 d	BRUCKNER_vl2d_21	-43,23	19	-24,26
viola a	BRUCKNER_vlaa_21	-33,94	15	-19,00
viola b	BRUCKNER_vlab_21	-35,49	15	-20,54
viola c	BRUCKNER_vlac_21	-34,69	15	-19,71
viola d	BRUCKNER_vlad_21	-35,79	15	-20,89
violonchelo a	BRUCKNER_vca_21	-31,60	15	-16,64
violonchelo b	BRUCKNER_vcb_21	-30,48	15	-15,50
contrabajo a	BRUCKNER_dba_21	-30,02	15	-15,02
contrabajo b	BRUCKNER_dbb_21	-30,92	15	-15,93

VIENTO-MADERAS				
flauta 1	BRUCKNER_fl1_21	-35,21	15	-20,28
flauta 3	BRUCKNER_fl1_21	-34,95	15	-19,97
oboe 1	BRUCKNER_ob1_21	-34,20	15	-19,22
oboe 2	BRUCKNER_ob2_21	-33,49	15	-18,50
oboe 3	BRUCKNER_ob3_21	-35,41	15	-20,43
clarinete 1	BRUCKNER_cl1_21	-29,89	15	-14,90
clarinete 2	BRUCKNER_cl2_21	-29,50	15	-14,52
clarinete 3	BRUCKNER_cl3_21	-32,61	15	-17,62
fagot 1	BRUCKNER_bsn1_21	-32,94	15	-17,95
fagot 2	BRUCKNER_bsn2_21	-34,10	15	-19,12
fagot3	BRUCKNER_bsn3_21	-33,48	15	-18,53
VIENTO-METALES				
trompeta 1	BRUCKNER_tr1_21	-10,82	10	-0,83
trompeta 2	BRUCKNER_tr2_21	-13,63	10	-3,68
trompeta 3	BRUCKNER_tr3_21	-14,36	10	-4,43
trompa 1	BRUCKNER_corno1_21	-25,22	17	-8,23
trompa 2	BRUCKNER_corno2_21	-26,22	17	-9,25
trompa 3	BRUCKNER_corno3_21	-26,77	17	-9,78
trompa 4	BRUCKNER_corno4_21	-26,42	17	-9,42
trompa 5	BRUCKNER_corno5_21	-26,44	17	-9,45
trompa 6	BRUCKNER_corno6_21	-25,46	17	-8,48
trompa 7	BRUCKNER_corno7_21	-29,06	17	-12,07
trompa 8	BRUCKNER_corno8_21	-29,12	17	-12,15
trombón 1	BRUCKNER_trb1_21	-13,69	10	-3,72
trombón 2	BRUCKNER_trb2_21	-13,26	10	-3,31
trombón 3	BRUCKNER_trb3_21	-10,58	10	-0,62
tuba	BRUCKNER_tuba_21	-17,89	15	-2,91
PERCUSIÓN				
timbales	BRUCKNER_timp_21	-11,41	11	-0,41

Tabla 5.1. Lista de audios con sus amplitudes de pico originales y finales

La amplificación de referencia para la sección de las cuerdas es de 15 dB. Los instrumentos de cuerda a los que ha sido añadido un valor más alto es debido precisamente a desequilibrios.

En los informes sobre trabajos de grabación en cámaras anecoicas se recalca el hecho de que, al ser un entorno desconocido para el intérprete, algunos ejecutan los sonidos de su instrumento más fuerte o más piano de lo habitual. La forma de reconocer estos desequilibrios se lleva a cabo de dos formas.

Un modo de evaluación es realizando auralizaciones experimentales y reconociendo los desequilibrios en volumen de sonido de las distintas secciones e instrumentos.



El segundo modo es a través del análisis de los valores de amplitud de las señales. En este caso se observan con mayor precisión estas diferencias. Dentro de un grupo del mismo instrumento se espera que los valores de amplitud sean muy similares, así se van ajustando.

También se tiene en cuenta que los intérpretes llamados solistas tocan, en general, un poco más fuerte que el resto de su sección. Esto sucede porque es un puesto especial que tiene como objetivo guiar a su sección y tiene, en ocasiones, pasajes solísticos diferenciados del resto del grupo. Estas dos condiciones hacen que el músico con este cargo toque levemente más fuerte que otros.

En el caso del viento-madera no es necesario hacer modificaciones individuales.

Para el viento-metal se han distinguido entre trombones y trompetas, que son los que emitieron sonidos con niveles de presión sonora más excesivos, dándoles una amplificación de 10 dB. Por otro lado a la sección de trompas se les aplicó un incremento de 17 dB y a la tuba de 15 dB.

Las variaciones en centésimas en la amplitud pico entre la señal original y la final son debidas al propio proceso de amplificación.

En Adobe Audition se emplea el efecto Amplificación. Amplitud y compresión > Amplificación aumenta o atenúa una señal de audio. Debido a que el efecto funciona en tiempo real, se puede combinar con otros efectos en el Bastidor de efectos.

## 5.2. Fase 2: Proceso de eliminación de ruido

Para el proceso de reducción de ruido se ha empleado un efecto del programa Adobe Audition CS 5.5 llamado "Reducción de ruido". Este efecto reduce significativamente el ruido de fondo y de banda ancha con una reducción mínima de la calidad de la señal. Este efecto permite eliminar una combinación de ruido, incluido el silbido de cinta, el sonido de fondo del micrófono, zumbido de línea de potencia o cualquier ruido constante en una forma de onda.

La cantidad adecuada de reducción de ruido depende del tipo de ruido de fondo y de la pérdida aceptable de calidad de la señal restante. En general, se puede aumentar la relación señal-ruido (signal to noise ratio - SNR) en un valor comprendido entre 5 y 20 dB y mantener una alta calidad de audio.

Para obtener los mejores resultados con el efecto Reducción de ruido, se debe aplicarlos al audio sin desplazamiento de DC. Con desplazamiento de DC, este efecto puede introducir chasquidos en pasajes tranquilos. (Para eliminar un desplazamiento de DC, se selecciona Favoritos > Reparar desplazamiento de DC.)

La figura 5.1 muestra la ventana gráfica del ruido en la pantalla de efecto Reducción de ruido.



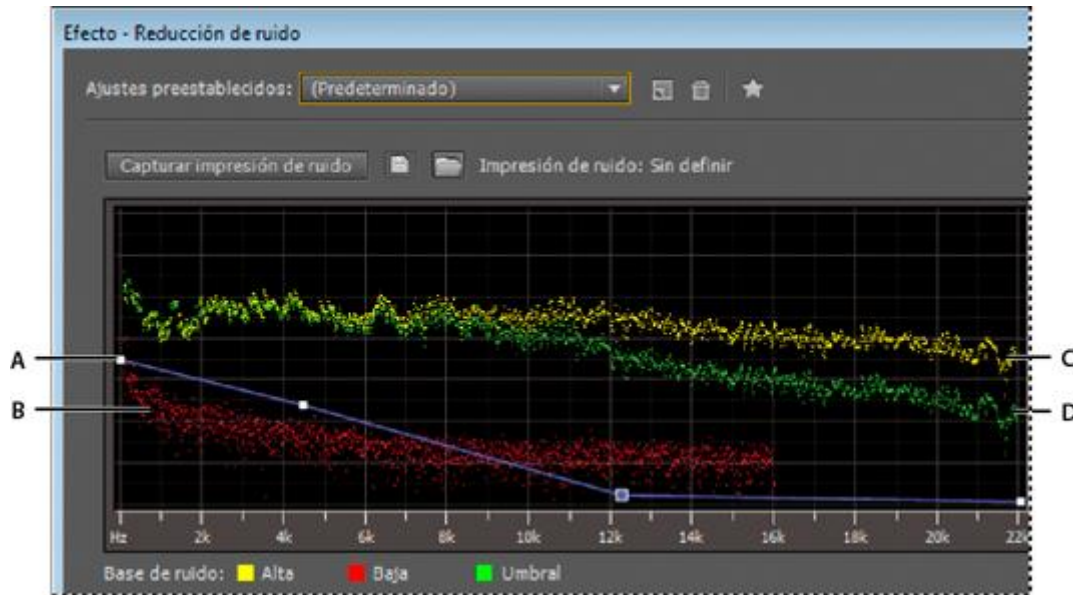


Figura 5.1. Ventana gráfico de Reducción de ruido

Evaluación y ajuste de ruido con el gráfico Reducción de ruido:

- A. Arrastre de los puntos de control para variar la reducción en diferentes rangos de frecuencia
- B. Ruido de amplitud baja.
- C. Ruido de amplitud alta
- D. Límite bajo el cual se produce la reducción de ruido.

56

### 5.2.1. Aplicación del Efecto Reducción de ruido

1. En el Editor de forma de onda, se selecciona un rango que solo contenga ruido y tenga una duración de medio segundo como mínimo.
2. Se selecciona Efectos > Reducción de ruido / Restauración > Capturar impresión de ruido.
3. En el panel Editor, se selecciona el intervalo del que se desea eliminar ruido.
4. Se selecciona Efectos > Reducción de ruido / Restauración > Reducción de ruido.
5. Definición de las opciones que se desean.

### Opciones de reducción de ruido

#### Capturar impresión de ruido:

Extrae un perfil de ruido de un rango seleccionado que indica solo ruido de fondo. Adobe Audition obtiene información estadística sobre el ruido de fondo para poder eliminarlo del resto de la forma de onda.

### Guardar la impresión de ruido actual:

Guarda la impresión de ruido como un archivo .fft que contiene información acerca del tipo muestra, el tamaño FFT (transformación rápida de Fourier – Fast Fourier Transform) y los tres conjuntos de coeficientes de FFT: uno para la cantidad mínima de ruido encontrada, otro para la cantidad máxima y un tercero para la potencia media.

### Cargar impresión de ruido de disco:

Abre cualquier impresión de ruido anteriormente guardado de Adobe Audition en formato FFT. Sin embargo, solo se pueden aplicar impresiones de ruido a tipos de muestra idénticos. (Por ejemplo, no se puede aplicar un perfil mono a 22 kHz a muestras estéreo a 44 kHz.)


Puesto que las impresiones de ruido son tan específicas, una impresión para un tipo de ruido no ofrecerá resultados satisfactorios en otros tipos. Sin embargo, si se eliminan los ruidos similares con regularidad, un perfil guardado puede mejorar la eficacia en gran medida.

### Gráfico:

Se muestra la frecuencia en el eje x (horizontal) y la cantidad de reducción de ruido en el eje y (vertical).

La curva de control azul establece la cantidad de reducción de ruido en diferentes rangos de frecuencia. Por ejemplo, si se necesita la reducción de ruido solo en las frecuencias más altas, se ajusta la curva de control hacia abajo a la derecha del gráfico.

57

Si se hace clic en el botón Restablecer  para bajar el tono o reducir la curva de control, la cantidad de reducción de ruido se basa por completo en la impresión de ruido.

### Base de ruido:

El valor Alta muestra la amplitud más alta de ruido detectado en cada frecuencia; la opción Baja muestra la amplitud más baja. La opción Umbral muestra la amplitud bajo la cual se produce la reducción de ruido.

### Escala:

Determina el modo en que se organizan las frecuencias a lo largo del eje x-horizontal:

- Para tener un control más preciso sobre las frecuencias bajas, se selecciona Logarítmico. Una escala logarítmica se asemeja más al modo en que las personas oyen el sonido.
- Para un trabajo detallado de alta frecuencia con intervalos espaciados uniformemente, se selecciona Lineal.

### Canal:

Muestra el canal de seleccionado en el gráfico. La cantidad de reducción de ruido siempre es la misma para todos los canales.

### Seleccionar todo el archivo:

Permite aplicar una impresión de ruido capturado al archivo completo.

### Reducción de ruido:

Controla el porcentaje de la reducción de ruido en la señal de salida. Se ajusta esta opción mientras se pre visualiza el audio para obtener la máxima reducción de ruido con los mínimos efectos no deseados. (Los niveles de reducción de ruido excesivamente altos pueden hacer que a veces el audio suene retardado o desfasado.)

### Reducir en:

Determina la reducción de amplitud del ruido detectado. Los valores comprendidos entre 6 y 30 dB tienen buenos resultados. Para reducir efectos de burbujeo, se introducen valores más bajos.

### Solo ruido de salida:

Pre visualiza solo el ruido, por lo que el usuario debe determinar si el efecto está eliminando algún tipo de audio útil.

58

### Ajustes avanzados:

Haciendo clic en Ajustes de reverberación aparecen las opciones siguientes:

**Velocidad de decadencia espectral:** Especifica el porcentaje de frecuencias procesado cuando el audio es inferior a la base de ruido. El ajuste de este porcentaje permite reducir más el ruido con menos efectos no deseados. Los valores comprendidos entre 40% y 75% son los que ofrecen mejores resultados. Por debajo de estos valores, con frecuencia se escuchan efectos no deseados con sonido de burbujeo; por encima de estos valores, normalmente se conserva demasiado ruido.

**Suavizado:** Tiene en cuenta la varianza de la señal de ruido en cada banda de frecuencia. Las bandas que presentan grandes variaciones cuando se analizan (por ejemplo, ruido blanco) se suavizan de forma diferente las bandas constantes (por ejemplo un zumbido de 60 Hz). En general, un incremento de la cantidad de suavizado (superior a 2 aproximadamente) reduce los efectos no deseados de burbujeo de fondo a costa de incrementar el nivel de ruido global de banda ancha de fondo.

**Factor de precisión:** Controla los cambios en la amplitud. Los valores de 5-10 funcionan mejor y los números impares son ideales para el procesamiento simétrico. Con valores de 3 o menos, la FFT se realiza en macro-bloques y entre ellos se pueden producir aumentos o disminuciones de volumen. Un valor mayor que 10 no produce ningún cambio apreciable de calidad pero aumenta el tiempo de procesamiento.

**Ancho de la transición:** Determina el rango de amplitud entre el ruido y el audio adecuado. Por ejemplo, un ancho de cero permite un gran control de ruido a cada banda de frecuencia. Se conserva el audio superior al límite y el inferior se trunca en silencio. Otra posibilidad consiste en especificar un rango a partir del cual el audio se silencia en función del nivel de entrada. Por ejemplo, si el ancho de transición es de 10 dB y el nivel de ruido escaneado para la banda concreta es de -60 dB, el audio a -60 dB permanecerá igual, el audio a -62 dB se reducirá ligeramente y el audio a -70 dB se eliminará completamente.

**Tamaño FFT:** Determina el número de bandas de frecuencia individuales que se va a analizar. Esta opción causa los cambios más radicales en la calidad. El ruido de cada banda de frecuencia se trata por separado, por lo que con más bandas, el ruido se elimina con mejor detalle de frecuencia. La configuración adecuada se sitúa entre 4096 y 8192.

Especifica un tamaño FFT, que determina el equilibrio entre frecuencia y precisión de tiempo. Los tamaños FFT superiores pueden causar efectos no deseados de reverberación o vibración, pero eliminan frecuencias de ruido de forma muy precisa. Un tamaño inferior de FFT genera un tiempo de respuesta mejor (por ejemplo, una reducción de la vibración antes de que golpeen los platillos) pero puede producir una resolución de frecuencia de peor calidad y crear sonidos huecos o desdoblados.

**Instantáneas de impresión de ruido:** Determina el número de instantáneas de ruido que se incluye en el perfil capturado. Un valor de 4.000 es óptimo para generar datos precisos.

59

Los valores muy pequeños influyen significativamente en la calidad de varios niveles de reducción de ruido. Con más instantáneas, es probable que un nivel de reducción de ruido de 100 elimine más ruido pero también eliminará más señal original. Sin embargo, un nivel bajo de reducción de ruido con más instantáneas también eliminará más ruido pero probablemente conservará la señal esperada.

### 5.2.2. Configuración aplicada:

Tras varias pruebas se ha decidido una configuración que se considera ajustada entre reducción de ruido efectiva y pérdida imperceptible de calidad respecto a la señal original.

Parámetros:

- Reducción de ruido: 50%
- Reducir en: 50 dB
- Velocidad de decadencia espectral: 65%
- Suavizado: 1
- Factor de precisión: 7
- Anchura de transición 0 dB
- Tamaño FFT: 4096

- Instantáneas de impresión de ruido: 4000

En la figura 5.2 se muestra a modo de ejemplo la ventana del efecto Reducción de ruido configurado.

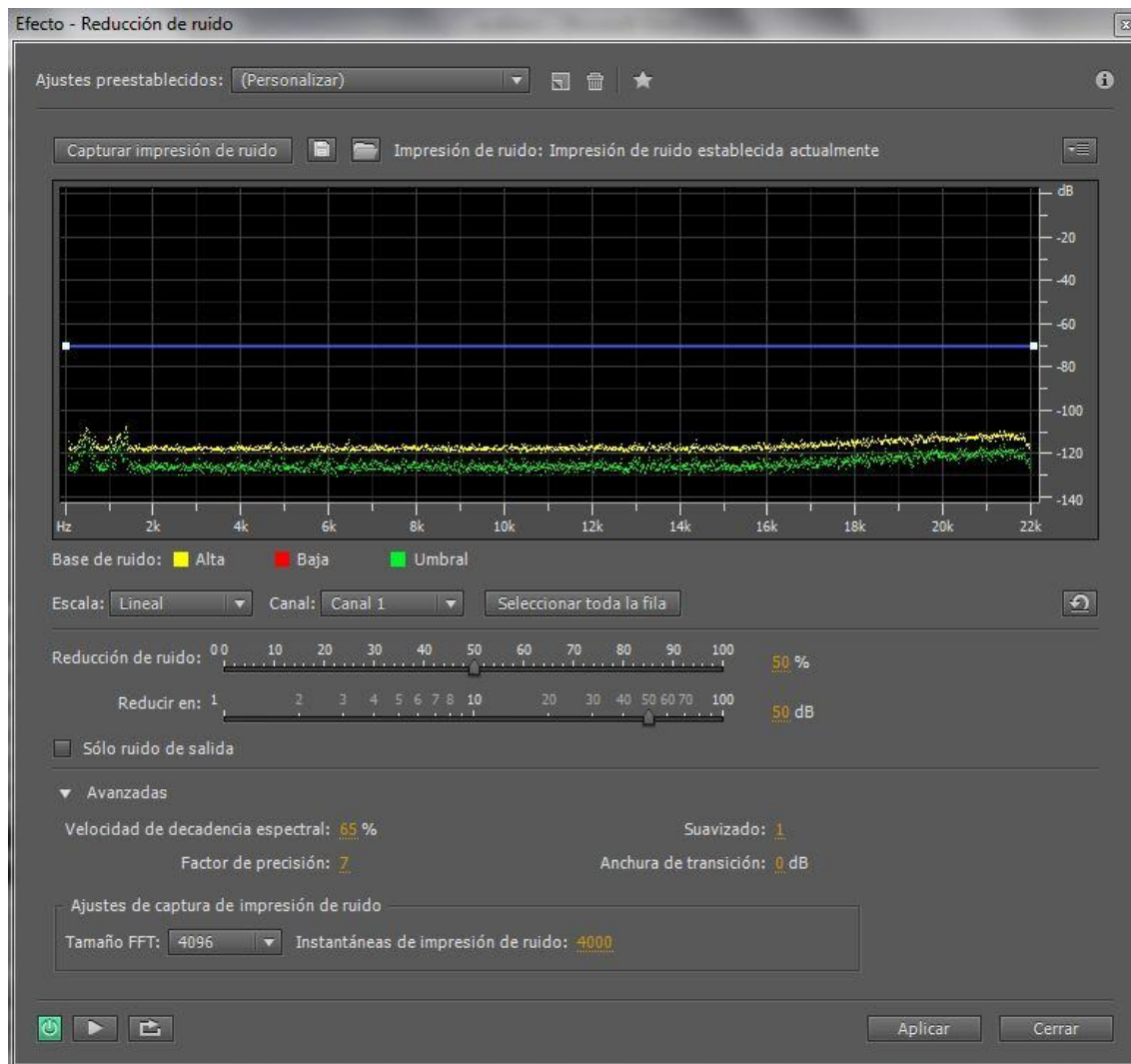


Figura 5.2. Ventana Efecto reducción de ruido

La Captura de impresión de ruido se ha realizado de forma independiente para cada señal original debido a ligeras diferencias en el ruido de fondo de cada una. Se han escogido los primeros segundos de las pistas. Las capturas de señal más cortas en el tiempo son las de los violines, de 2 segundos, por lo que no hay ningún problema añadido por falta de muestras de impresión de ruido.

En la figura 5.3 se representa un análisis espectral del audio de violín 1a antes del proceso de eliminación de ruido comparado con el espectro resultante tras dicho proceso.

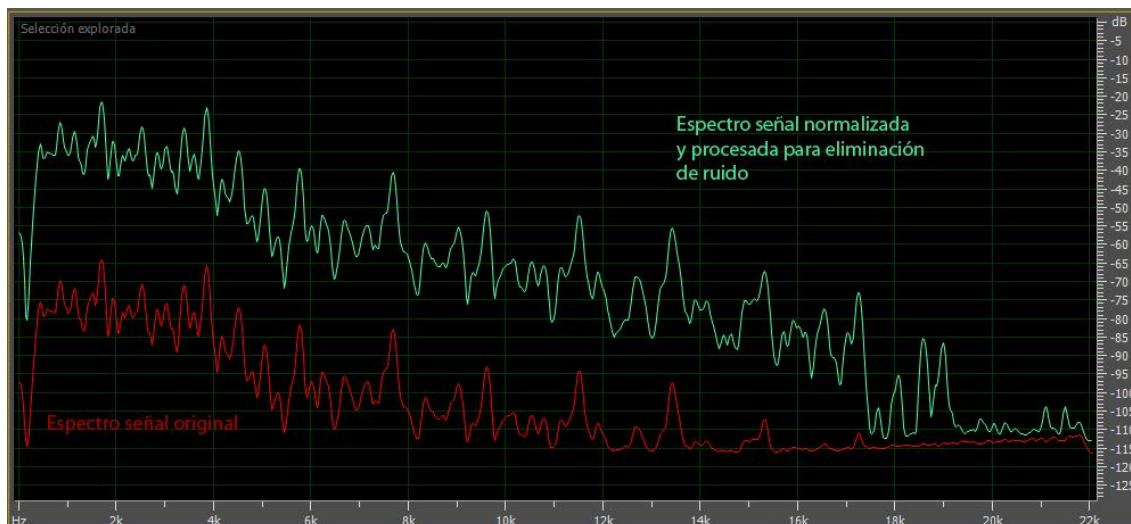


Figura 5.3. Análisis espectral comparativo señal original y señal tratada

En rojo se muestra el espectro de la señal original. Puede observarse que a partir de los 16 KHz se da una pérdida importante de información frecuencial. La relación señal-ruido es muy mala.

En verde se muestra el espectro de la señal tras los procesos de amplificación y eliminación de ruido. Por una parte se confirma que la forma de la onda se mantiene, por lo que se deduce que no hay alteraciones en el espectro y, por consiguiente, no hay pérdida de realismo, en cuanto a frecuencia. Además, se aprecia una recuperación de la señal original en las frecuencias más altas. Esto se debe al sistema de Reducción de ruido que ejecuta Adobe Audition, logrando una señal mejorada, con mejor calidad en la relación señal-ruido y más realista.

61

### 5.3. Fase 3: Tratamiento multipista

En este proyecto se han generado tres mezclas distintas de auralizaciones. La primera es una simulación con fuentes puntuales por cada audio por lo que se han empleado las señales de forma independiente tras la aplicación de los dos procesos anteriormente descritos. La segunda es una simulación por secciones de instrumentos y la tercera es una auralización utilizando una sola fuente, por esta razón, estos dos modelos de auralización han requerido un tratamiento previo de las señales para agruparlas manteniendo equilibrio entre las distintas secciones y sin saturarlas.

Para este proceso se ha trabajado en una sesión multipista. En el Editor multipista, se pueden mezclar varias pistas de audio para crear bandas sonoras en capas y elaborar composiciones musicales. Se puede grabar y mezclar infinitas pistas y cada una de ellas puede incluir tantos clips como se necesite, el único límite es el espacio del disco duro y la potencia de procesamiento.

El Editor multipista es un entorno de edición en tiempo real extremadamente flexible, que permite cambiar los ajustes durante la reproducción y escuchar inmediatamente los resultados. Por ejemplo, mientras se escucha una sesión, se puede ajustar el volumen de la pista para fusionar las pistas de forma correcta. Los cambios realizados son temporales o no destructivos.

Adobe Audition guarda la información de los archivos de origen y mezcla los ajustes en los archivos de sesión (.sesx). Los archivos de sesión son relativamente pequeños, ya que solo contienen los nombres de ruta de los archivos de origen y las referencias a los parámetros de mezcla (como el volumen, la panorámica y los ajustes de efectos).

### 5.3.1. Edición de sesiones multipista en el panel Editor y el Mezclador:

En el Editor multipista, el panel Editor proporciona varios elementos que sirven para mezclar y editar sesiones. En los controles de pista situados a la izquierda, se pueden modificar los ajustes de una pista específica, como el volumen y la panorámica. En la línea de tiempo, a la derecha, se editan los clips y las envolventes de automatización de cada pista.

La figura 5.4 muestra el aspecto visual del Editor multipista.

62

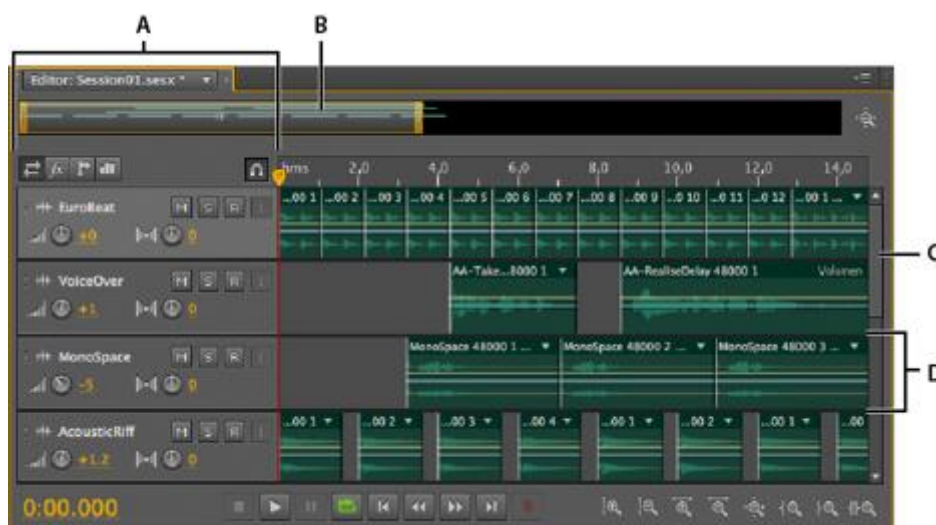


Figura 5.4. Panel Editor en el Editor multipista

A. Controles de pista. B. Navegador de zoom. C. Barra de desplazamiento vertical. D. Pista

El Mezclador (Ventana > Mezclador) proporciona una vista alternativa de la sesión, mostrando un número mayor de pistas y controles de forma simultánea, sin mostrar los clips (figura 5.5).



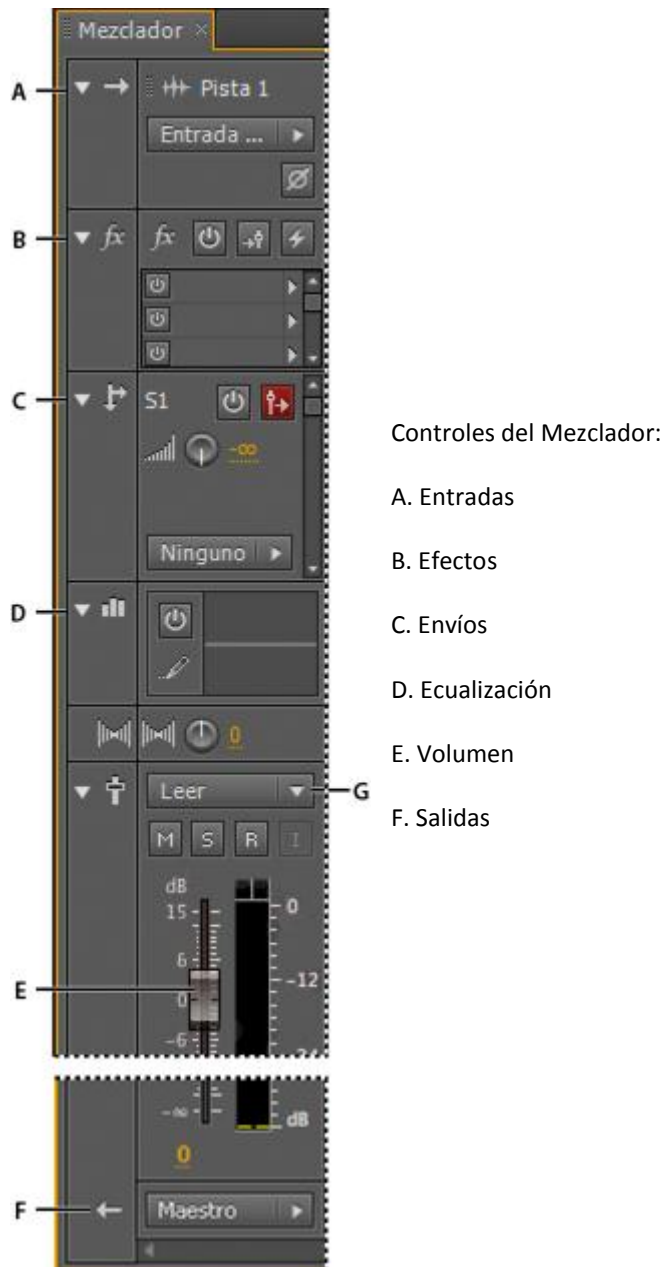


Figura 5.5. Ventana de controladores del mezclador

La orquesta que se simula es una orquesta sinfónica de grandes dimensiones. El número de cuerdas estándar es: 16 violines primeros, 14 violines segundos, 12 violas, 10 violonchelos y 8 contrabajos.

Las cuerdas se han dividido en cinco secciones: Sección de violines primeros, sección de violines segundos, sección de violas, sección de violonchelos y sección de contrabajos.

Existen para este trabajo 8 grabaciones originales de 8 violinistas primeros diferentes ejecutando el pasaje orquestal. Para la implementación de la sección de violines primeros se han creado 16 pistas, repitiendo cada señal dos veces.



De la sección de violines segundos solamente había disponibles 4 grabaciones originales por lo que se han repetido los violines 2a y 2b cuatro veces cada uno y los violines 2c y 2d tres veces cada uno.

La sección de violas consta de 4 grabaciones. Se ha repetido cada una tres veces.

La sección de violonchelos contiene 2 grabaciones originales distintas por lo que ha sido necesario repetir cada una cinco veces.

La sección de contrabajos contiene 2 grabaciones originales distintas por lo que ha sido necesario repetir cada una cuatro veces.

El hecho de repetir varias señales en pistas diferentes, objetivamente, supone una pérdida de realismo pero se logra la amplitud deseada para cada sección.

En la parte de vientos y percusión, los papeles musicales son individuales para cada ejecutante; no es necesario repetir señales originales en otras pistas.

Una sexta sección mezclada es la que agrupa a todo el viento-madera: 2 flautas, 3 oboes, 3 clarinetes y 3 fagots.

La séptima y última sección mezclada agrupa al viento-metal y la percusión: 3 trompetas, 3 trombones, 8 trompas, 1 tuba y 1 batería de timbales.

Para que las mezclas no saturasen se les ha aplicado previamente una atenuación de 10 dB a cada señal individual.

Una vez hechas las reducciones de amplitud y las mezclas, se han exportado las sesiones multipista dando lugar a siete audios: violines1-10, violines 2-10, violas-10, violoncellos-10, bajos-10, maderas-10, metalespercu-10. Estas son las señales empleadas para la auralización por secciones.

Posteriormente, para la creación de la fuente puntual omnidireccional, se ha procedido a una nueva mezcla multipista de las siete mezclas por secciones dando lugar a una única señal con todos los instrumentos llamado tuttimezcla-10.

Todos estos archivos de audio se encuentran disponibles en el DVD de este PFC.

## 6. TEST PSICOACÚSTICO

Este apartado explica el proceso de formulación, ejecución y análisis de los resultados de un test psicoacústico para evaluar la percepción subjetiva de las auralizaciones realizadas.

### 6.1. Soporte informático:

El software utilizado para crear el test es el programa Matlab R2011b.

Para la visualización del test se ha creado una GUI, que es el interfaz visual de Matlab. De este modo se ha creado un modelo de pantalla de test que consta de varias partes (figura 6.1).

Posición público (1 de 4)

Cuantifica el grado de realismo de los siguientes sonidos:

Play Stop

1 Máximo Realismo 0 Mínimo Realismo

2 Máximo Realismo 0 Mínimo Realismo

3 Máximo Realismo 0 Mínimo Realismo

¿En qué fundamentas tu valoración?

Siguiente

65

Figura 6.1. Ventana general del test

La primera pantalla del programa es un mensaje de bienvenida y una breve definición de en qué consiste el test.

La segunda pantalla es explicativa. En la figura 6.2 se puede ver cómo aparecen varias indicaciones en color rojo y verde del funcionamiento de la pantalla.

**En esta esquina se menciona la localización del receptor**

Cuantifica el grado de realismo de los siguientes sonidos:

**Play: reproduces desde el inicio la señal seleccionada** **Stop: paras la reproducción**

**Play** **Stop**

**NOTA: Puedes cambiar la selección de la señal durante la reproducción las veces que desees.**

☒ **1: Señal seleccionada** ☐ **2: Señal seleccionable** ☐ **3: Señal seleccionable**

Máximo Realismo

Al desplazar la barra selecciona una valoración que aparece cuantificada en el cuadro

0

Mínimo Realismo

Máximo Realismo

0

Mínimo Realismo

Máximo Realismo

0

Mínimo Realismo

¿En qué fundamentas tu valoración?

**Justifica, con tus propias palabras, en este cuadro la valoración realizada. Por favor, no pulsar la tecla INTRO.**

**NOTA: Pulsa Stop antes de pasar a la siguiente pantalla.**

**Tómate el tiempo que necesites para concentrarte.**

**Cuando estés preparado pulsa "comenzar test"** **Comenzar test**

Figura 6.2. Ventana explicativa del test

66

En la esquina superior izquierda es una referencia para el sujeto, en ella aparece escrita la posición virtual del receptor. En unas es la posición del director y en otras la posición de público. También informa, entre paréntesis, el número de paso, de cuatro que son, en que se está.

A continuación está la cuestión que se plantea: Cuantificar el grado de realismo de los sonidos escuchados.

Tras la pregunta se encuentran los botones de “Play” y “Stop”. Play comienza a reproducir el audio seleccionado desde el comienzo de la pista. Stop para la reproducción. Si vuelve a pulsarse Play, la pista comienza desde el principio.

Debajo de estos botones aparecen tres botones interrelacionados. Estos botones están representados como “1”, “2” y “3”. Cuando se selecciona uno, se deselecta el que estaba previamente seleccionado. Solamente puede haber uno activo al mismo tiempo. Estos tres botones corresponden a los tres modelos de orquesta para la posición en la que se encuentra y el modelo de sala concreto. En cada pantalla el orden en el que se encuentran los audios es diferente para evitar que el sujeto establezca un orden en función de la numeración o tener posibles influencias en el orden en que se colocan. Además, la reproducción puede comenzar en cualquiera de los tres puntos y escucharse tantas veces se quiera y en el orden deseado.

Las pantallas 1 y 2 de 4 contienen las auralizaciones en la sala ajustada; las pantallas 3 y 4 de 4, la sala absorbente.

Bajo estos números hay una barra en cada uno. Esta barra es editable de forma que el sujeto la desplaza verticalmente para indicar el grado de realismo percibido en esa audición. El punto más alto indica máximo realismo y el punto más bajo el mínimo realismo. Junto a estas barras hay un cuadro donde se refleja la notación del 0 al 10 que sirve de referencia para el sujeto. La posición de la barra guarda este mismo valor en un archivo de texto junto con los comentarios que responden a la pregunta “¿En qué fundamentas tu valoración?” cuando se hace clic en el botón de siguiente, que se encuentra en la esquina inferior derecha de la pantalla.

Esta pregunta se realiza para estudiar en qué se han fijado los sujetos o que diferencias en el sonido han percibido. Se ha considerado que de esta pregunta se puede extraer información sobre dónde ponen los sujetos la atención a la hora de intentar evaluar, a esta pregunta genérica, su percepción de realismo de los distintos sonidos.

Se ha escrito un código que permite reproducir los sonidos de forma que, al cambiar de pista, se produce un crossfade casi imperceptible a la vez que se introduce la nueva pista de audio en el mismo instante donde se encontraba la anterior.

Para ello se ha empleado una herramienta llamada Playrec que es compatible con Matlab. Playrec es una utilidad que proporciona un acceso fácil y versátil para tarjetas de sonido que utilizan PortAudio, una librería libre, de código abierto de audio I/O. Se puede utilizar en diferentes plataformas (Windows, Macintosh, Unix) y acceder a la tarjeta de sonido a través de la API de host diferente incluyendo ASIO, DirectSound y WMME bajo Windows.<sup>25</sup>

Una de las principales características de Playrec es que no bloquea el acceso de la tarjeta de sonido. Todas las muestras se almacenan de forma que Matlab puede continuar con otro procesamiento mientras la salida y la grabación están activas.

Otra ventaja es que la grabación es continua y no genera problemas técnicos. Todas las nuevas muestras de salida se añaden automáticamente a cualquier muestra restante. Esto hace posible que los datos de audio sean generados como se requiere. El único límite es la capacidad de procesamiento del ordenador. También es posible hacer grabaciones en múltiples secciones sin perder muestras.

Además tiene ventajas como una configuración mínima sin necesidad de especificar muchos datos de entrada que se gestionan de forma dinámica, no impone restricciones en la cuenta de muestras y tiene una función de apoyo a la tarjeta de sonido en el trabajo multicanal entre otras.

Posteriormente se ha creado un archivo en formato ejecutable (.exe) que requiere un sistema operativo Windows XP (32 bit) y archivos adicionales en caso de no tener instalado dicho ordenador Matlab.

El DVD de este PFC contiene los datos del código, figuras y el programa ejecutable.

---

<sup>25</sup> <http://www.playrec.co.uk/>

## 6.2. Perfil de los sujetos participantes:

Han participado en la realización del test un total de 60 sujetos de los cuales 37 son hombres y 23 mujeres. Las edades están comprendidas entre los 15 y los 54 años y la edad media de los 60 sujetos es de 25,75 años, teniendo la mayoría de sujetos entre 19 y 25 años. Ninguno de ellos presenta problemas auditivos y han realizado el test con el mismo nivel de amplitud en los auriculares.

Los auriculares son el modelo AKG K-44, que tienen una eficiencia de 115 dB SPL/V, rango frecuencial de 18 a 20000 Hz, impedancia de 32 ohmios y una potencia máxima de entrada de 200 mW.

El ordenador utilizado es un portátil HP Probook con sistema operativo Windows XP (32 bit). La tarjeta de sonido es integrada de serie de la marca Realtek.

A todos los sujetos se les ha dado una explicación oral junto con la pantalla explicativa y se les ha orientado advirtiéndoles que se centren en la síntesis de la orquesta como conjunto. También se les ha pedido que obvien el ruido de fondo perceptible en algunas de las grabaciones (este ruido se genera al generar las auralizaciones y se ha considerado que eliminar más ruido podría afectar al realismo de la señal original). Se les ha dado un tiempo máximo de 30 minutos para la realización completa del test. Todas las sesiones se han llevado a cabo en un entorno silencioso.

68

30 sujetos son estudiantes o profesionales de música clásica, todos ellos alumnos o profesores del Conservatorio Superior de Música de Navarra. Tienen una media de 18,63 años de experiencia y un mínimo de 8. Se han elegido músicos porque está postulado que los oídos musicalmente entrenados deberían percibir más que los oídos musicalmente no entrenados. Investigaciones previas muestran que los músicos tienen mayor capacidad de detectar parciales de tonos complejos, lo que significa que pueden detectar diferencias menores en la composición frecuencial de los sonidos. Se presupone que los músicos tienen más aptitudes para detectar las diferencias existentes entre las diferentes auralizaciones que los legos en música.<sup>26</sup>

Los otros 30 sujetos son legos, no han recibido formación musical ni practican la interpretación con ningún instrumento. El objetivo de hacer el test a estos sujetos es evaluar las diferencias en las respuestas entre estos y músicos.

## 6.3. Análisis y valoración de los resultados:

Tras la finalización de los test se ha procedido a recopilar toda la información y estudiar estadísticamente la información recogida. La herramienta empleada para este trabajo es el programa de software Excel de Microsoft Office 2010.

---

<sup>26</sup> An introduction to the psychology of hearing. Moore BCJ. 5ª ed. Elsevier. London, England, 2004.

Se han calculado promediados, suma de respuestas, desviaciones típicas e Histogramas. Los valores y gráficos se han analizado en el conjunto de los 60 participantes y por separado en las dos categorías de Músicos y Legos. Se han realizado tanto comparativas respecto a las percepciones entre configuraciones de orquesta como ajuste de sala – receptores.

En los histogramas se ha prestado especial atención al valor del 50% y las pendientes como información más relevante de estos.

Las hojas Excel con los resultados, gráficas y comentarios se encuentran en el DVD de este PFC.

En la tabla 6.1 se muestra la puntuación media, la desviación típica y puntuaciones máxima y mínima de cada una de las doce configuraciones Sala-Receptor-Orquesta. La primera fila indica la posición receptor y la sala. Audiencia: receptor en butacas. Escenario: receptor en posición director. Sala: sala ajustada. Sala abs: sala absorbente. La segunda fila indica el modelo de orquesta simulada. Omni: una fuente omnidireccional. Secc: siete fuentes representando las secciones de la orquesta. Tutti: una fuente por músico.

	Audiencia – sala			Escenario – sala			Audiencia – sala abs			Escenario – sala abs		
	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	tutti
Media	5,2	6,3	7,1	4,7	6,4	6,8	5,7	6,5	4,6	5,0	6,8	5,8
desvest	2,5	1,7	1,9	2,2	1,9	1,9	2,4	1,8	2,1	2,3	2,0	1,7
max	10	9,5	10	9,5	9	10	10	10	9	10	10	9,5
min	1	2	3	1	1,5	2,5	1	2	1	1	1,5	2

Tabla 6.1. Resultados generales de los test psicoacústicos

Comenzando por los valores mínimos podemos deducir para las dos posiciones de fuente en la sala ajustada que los valores son los esperables. El mínimo es 1 en ambos receptores, cuando era posible puntuar por debajo hasta 0, lo que parece indicar que el cero se ha considerado un valor excesivamente bajo. En ambas posiciones de receptor se ve cómo el valor mínimo puntuado es mayor cuanto mayor es el realismo a nivel teórico; desde el menos realista, fuente omnidireccional, hasta el más realista, fuente por músico. Sin embargo, esto no ocurre en la sala absorbente con receptor en audiencia, cuyo mínimo más alto lo tiene la configuración de secciones.

Los valores máximos no siguen ningún patrón aparentemente pero sí es llamativo en la sala absorbente, que el menor máximo es la configuración Tutti con un 9, con receptor en audiencia, y un 9,5, con receptor en escenario, mientras que las otras dos configuraciones tienen un máximo de 10.

Si se observan las notas medias se encuentran los valores esperados para las dos posiciones de receptor en la sala ajustada. Las notas medias con menos puntuación son las de una fuente omnidireccional, seguidas por la configuración de secciones y acabando, con la máxima puntuación, en la configuración de Tutti.

En la posición de audiencia en la sala ajustada las distancias entre las tres medias es equilibrada y la mayor puntuación de las doce auralizaciones es la correspondiente a la configuración Tutti con un 7,1. Esto puede ser debido a varias razones. Una de ellas es que, junto con la posición en escenario, es la configuración que pretende ser más realista. Como se explicará con más detalle más adelante, también la sala ajustada resulta dar sensación de mayor realismo que la absorbente, ya que, una sala tan absorbente es difícil de encontrar en la realidad. A esto se añade que esta configuración de fuentes ha sido la que se ha utilizado como referencia para ajustar el equilibrio entre instrumentos. También puede haber influido que el ruido de fondo en este audio es inferior a los que se escuchan en la sala absorbente en general.

En la posición de director en la sala ajustada se han descubierto algunos datos predecibles y otros que no. La fuente omnidireccional ha perdido 0,5 puntos de media respecto a la otra posición. Esto es esperable debido a que, al estar más próximo a la fuente, se pierde sensación de espaciosidad. El sujeto, sabiendo que se encuentra rodeado de músicos, percibe cómo el sonido le llega menos envolvente de lo que considera real. Como consecuencia, las Secciones y Tutti sí generan esa percepción. Sin embargo, la configuración de Tutti ha perdido nota media mientras que la de Secciones ha aumentado ligeramente su valoración. Esto puede estar influido por el equilibrio anteriormente mencionado. Los diferentes sonidos de cada instrumento llegan menos equilibrados que en la posición del público debido a la posición del director. Esto es un hecho que también ocurre en la realidad pero al que solamente directores están acostumbrados a percibir y puede haber influido en la sensación de realismo. Esto parece significar que el equilibrio en amplitud entre los diferentes instrumentos influye subjetivamente en la percepción de realismo para algunas personas. Algunos de los comentarios hacen alusión a este hecho junto con expresiones como sensación de envolvente, nitidez o capacidad de distinguir por separado los instrumentos. Por otro lado, las Secciones conservan mayor equilibrio debido a que estas han sido equilibradas conjuntamente en una pista previamente a realizar la auralización.

Este último razonamiento puede dar respuesta a lo sucedido en la sala absorbente. En ambas posiciones de receptor, en la sala absorbente, la configuración de fuentes que más valoración ha obtenido ha sido la de Secciones. Precisamente el condicionante de la directividad y de distribución de las fuentes sobre el escenario en el caso de la configuración Tutti genera gran desequilibrio entre instrumentos en la sala absorbente haciendo que sea peor puntuada que la fuente omnidireccional desde el receptor del público, y llegando al extremo de ser la peor calificada de todas las auralizaciones con un 4,6. Además, esta nota inesperablemente baja, puede deberse a que este audio es el que más ruido de fondo posee.

Sin embargo, en la comparación entre posiciones de receptor, existen diferencias. La puntuación media de la configuración Tutti desde la posición de escenario es mejor que desde la posición de audiencia. Además, desde la posición de director, al contrario que desde la posición desde el público, la nota media de la configuración Tutti supera a la Omni. Esto puede ser debido, nuevamente, a la sensación de espaciosidad que generan las fuentes circundantes al receptor en posición escenario en la configuración de Tutti y que no genera la configuración Omni.

De esta diferencia entre receptores se deduce que, como es de esperar, la percepción de espaciosidad en una sala absorbente es menor cuanto más alejada se encuentra el receptor de las fuentes y, por tanto, la sensación de realismo entre las configuraciones se reduce.

Las desviaciones típicas se solapan en todos los casos (figura 6.3). Este parámetro refleja que los valores están muy dispersos y, por tanto, esta información es insuficientemente fiable.

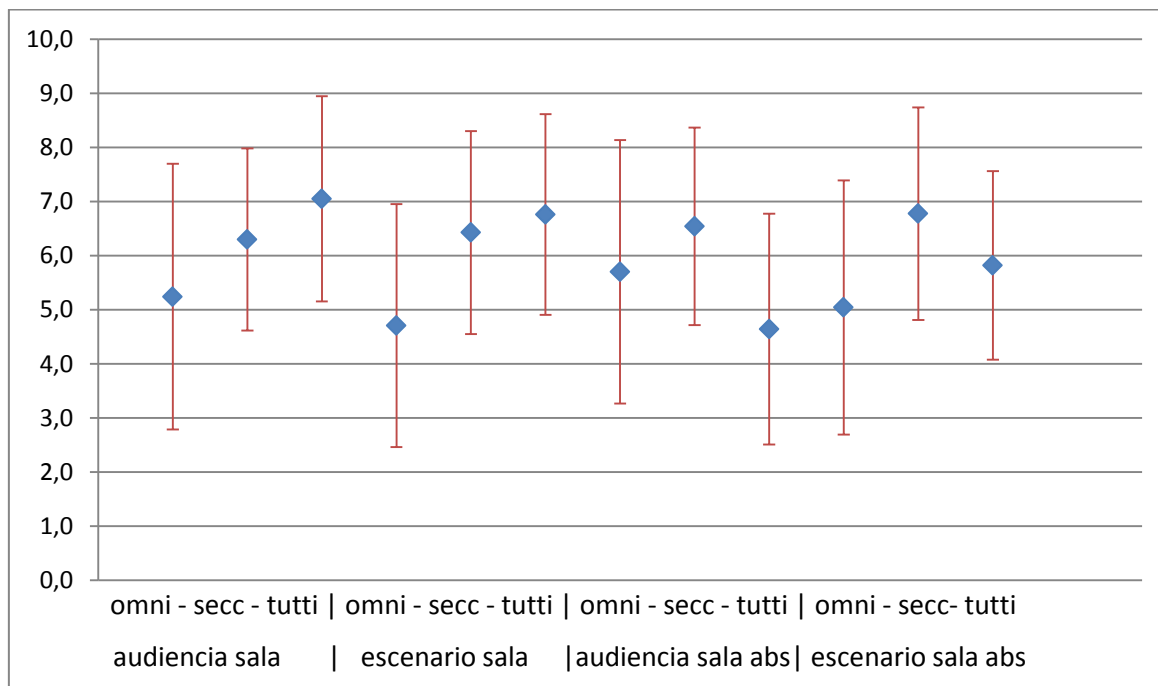


Figura 6.3. Medias con desviación típica

Un dato interesante es que las únicas configuraciones de fuente que superan una puntuación de desviación típica superior a 2,0 son todas las de fuente omnidireccional y la Tutti con receptor en audiencia en sala absorbente. La claridad y el equilibrio entre instrumentos se conservan en todas las versiones de la fuente omnidireccional, lo que puede afectar a algunos oyentes como sensación de realismo. Sin embargo, la falta de sensación envolvente o de anchura de fuente es detectada por otros como falta de realismo. A estas se añade la Tutti con receptor en audiencia en sala absorbente, la cual resulta confusa al oyente por motivos anteriormente citados y, esta confusión, podría ser la causa de una alta desviación. Estos argumentos pueden justificar estas desviaciones.

El análisis de histogramas permite dar solidez a estas valoraciones. A la altura del 50% del histograma acumulado se ha comprobado que en la posición de audiencia de la sala ajustada los valores son similares a las medias. También se ha visto que aumenta la pendiente de la configuración Tutti entre las puntuaciones de 7 a 9, lo que significa que son los valores más puntuados (figura 6.4).



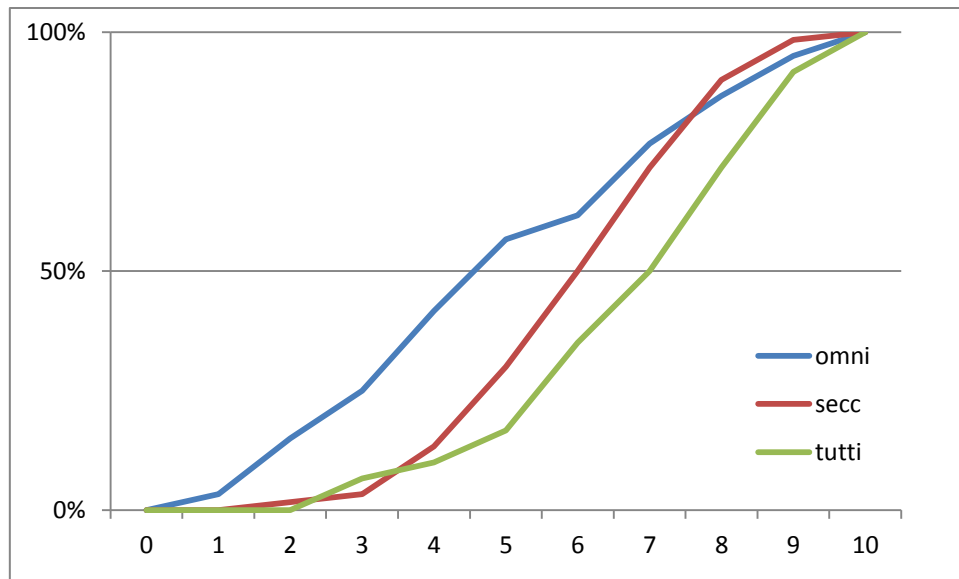


Figura 6.4. Histogramas acumulados configuraciones posición audiencia sala ajustada

En el histograma que muestra los resultados para la posición de escenario en la sala ajustada ocurre que desde las puntuaciones más bajas a las más altas las configuraciones de Secciones y Tutti van muy juntas, mientras que la Omni se aleja hacia las bajas puntuaciones considerablemente. Esto refuerza la teoría de que la falta de sensación envolvente en la Omni se perciba como poco realista. Los desequilibrios entre instrumentos en la configuración Tutti justifica que resulte menos realista (figura 6.5).

72

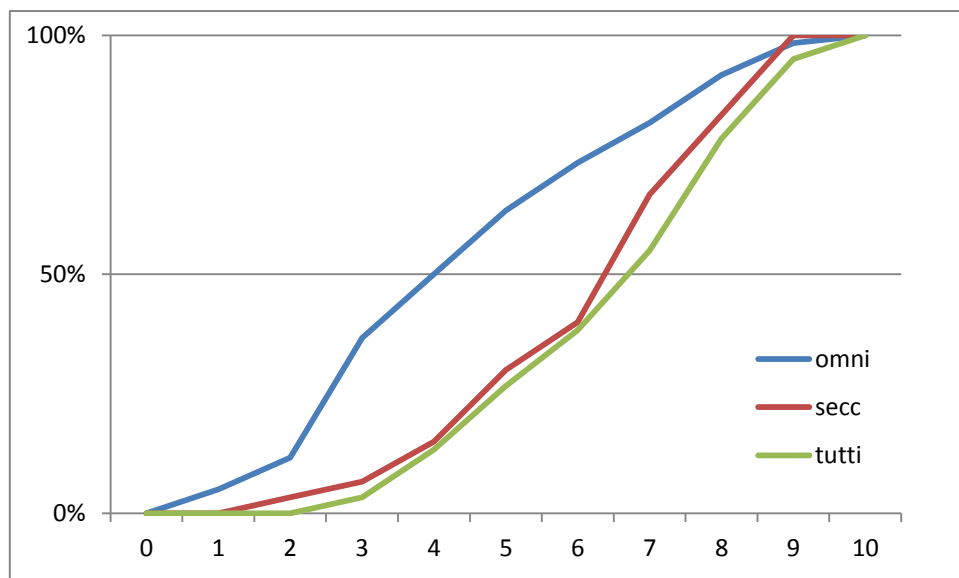


Figura 6.5. Histogramas acumulados configuraciones posición escenario sala ajustada

Esto parece confirmar que la anchura de fuente es un elemento clave en la percepción de realismo en posiciones cercanas a las fuentes.

El resultado menos predecible es en el caso de la sala absorbente en posición de audiencia. La configuración Tutti es claramente la valorada como menos realista, estando la pendiente más abrupta entre el 3 y el 5. Además están marcadamente separadas las otras dos configuraciones. Los músicos comentan repetidamente en las justificaciones a sus valoraciones sobre la configuración Tutti que la reverberación es excesivamente baja para parecer real, que parece estar tocando el grupo en una sala muy pequeña (asociación de poca reverberación con sala de reducidas dimensiones), que los instrumentos suenan desequilibrados (en general, que suenan demasiado los vientos). Los legos utilizan expresiones como que parece una grabación antigua y que se oye como si estuviera lejos (figura 6.6).

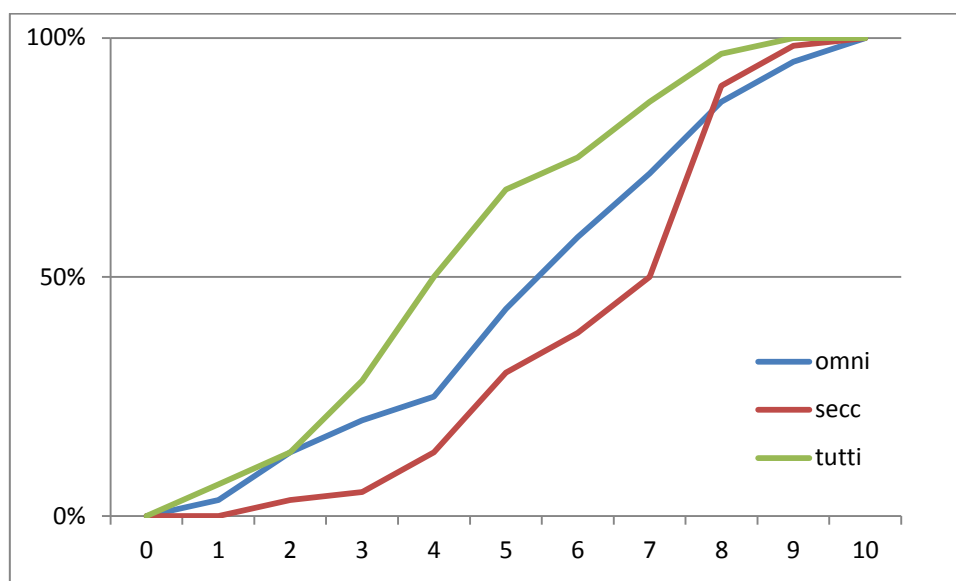


Figura 6.6. Histogramas acumulados configuraciones posición audiencia sala absorbente

Otro comentario muy generalizado es el de que la sala absorbente suena a “metálico”. Esta percepción está relacionada con las características de la sala absorbente en cuanto a reverberación.

En la posición de escenario en la sala absorbente se confirma, al 50% de histograma acumulado, que la configuración Omni, al no dar sensación envolvente, es valorada como la menos realista. Al igual que en la anterior posición, la configuración Tutti suena menos real que la de Secciones. A pesar de esta diferencia entre Omni y Tutti al 50%, el histograma revela que a partir del 70% ambas configuraciones van casi a la par lo que refleja mucha confusión al respecto. Parece ser que el desequilibrio entre instrumentos del Tutti supone para algunos sujetos mayor falta de realismo que la falta de sensación envolvente mientras que para otros la prioridad es la contraria (figura 6.7).

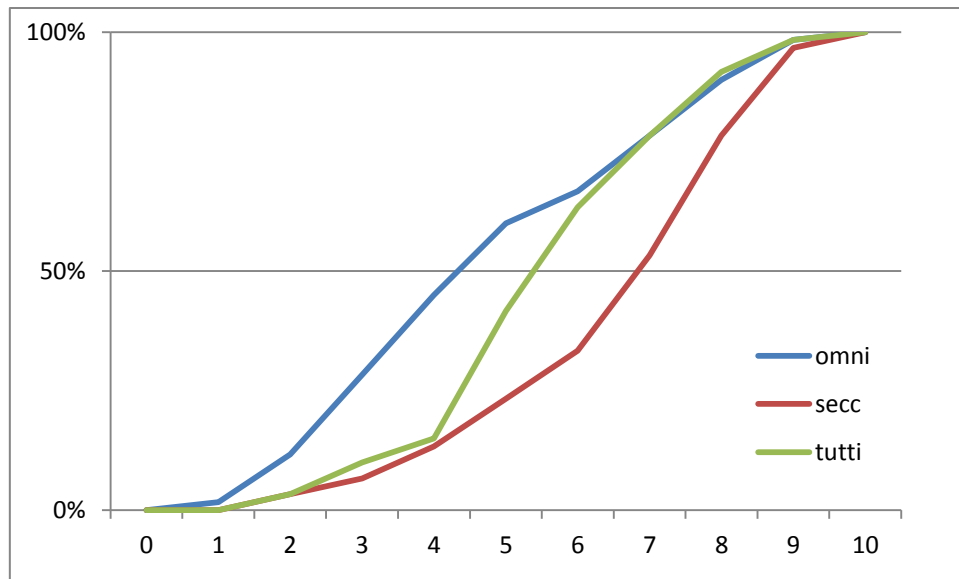


Figura 6.7. Histogramas acumulados configuraciones posición escenario sala absorbente

Al comparar los cuatro modelos de receptor y sala para cada una de las tres configuraciones de fuente se observa como la Omni (figura 6.8) resulta más realista cuanto más alejado está el receptor, lo cual es lógico, al llegar menos sonido directo. La configuración de Secciones (figura 6.9) es la que más se asemeja para los cuatro casos, puesto que supone un intermedio entre equilibrio entre instrumentos en la señal original y sensación de anchura de fuente aunque, resultan algo más realistas cuando el tiempo de reverberación es bajo. Por el contrario, la configuración Tutti (figura 6.10) resulta más realista cuando los tiempos de reverberación son mayores. Además, esta última es mucho más dispersa, lo que refleja la influencia de varios factores.

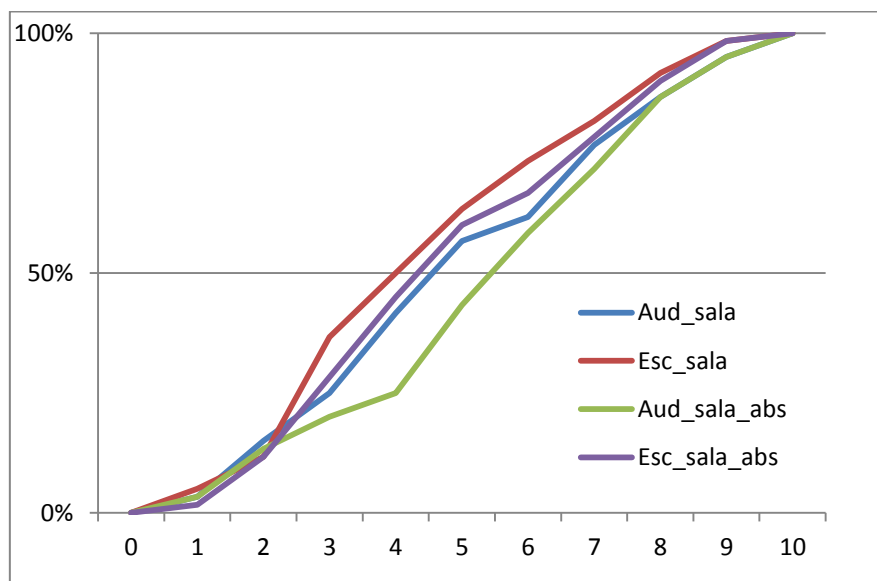


Figura 6.8. Configuración Omni

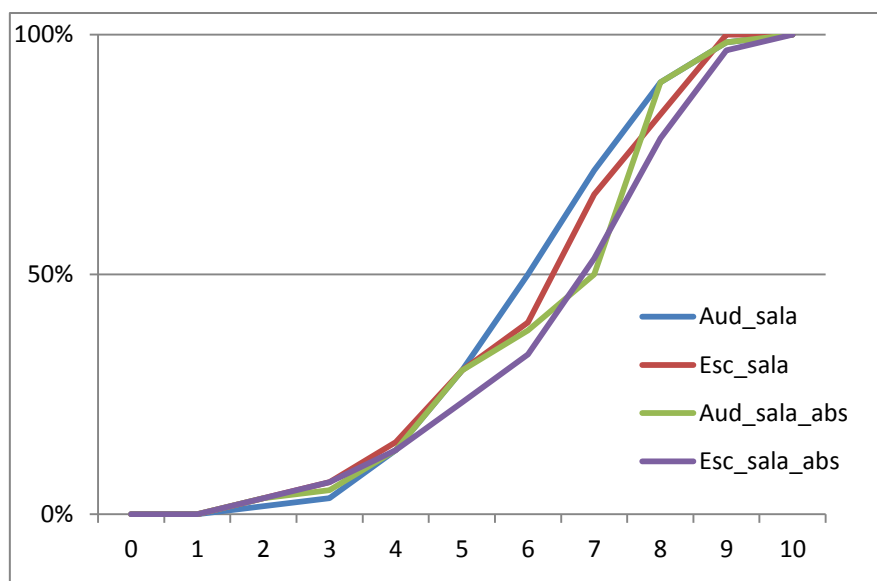


Figura 6.9. Configuración Secciones

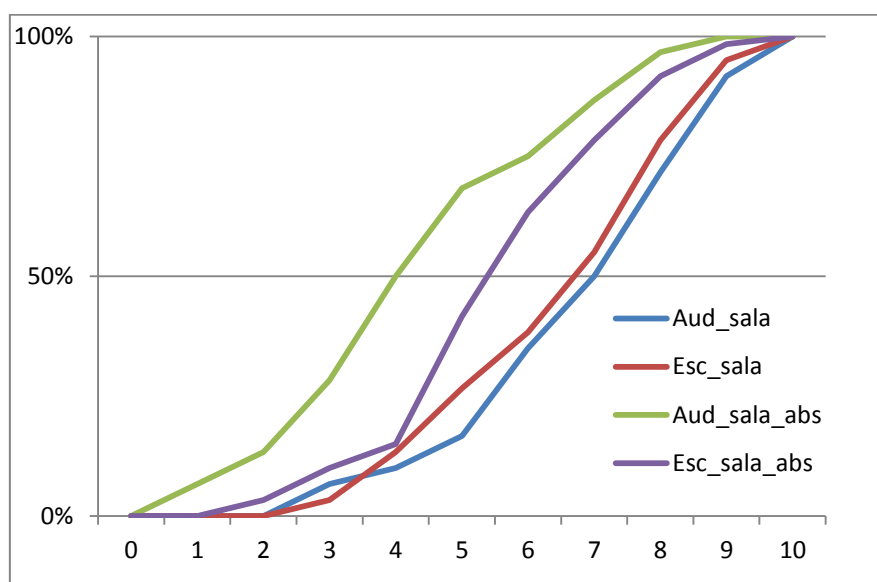


Figura 6.10. Configuración Tutti

En el análisis por separado los resultados de los músicos y de los legos se dan algunas diferencias. En la tabla 6.2 se muestra una comparativa de las medias.

	Audiencia – sala			Escenario – sala			Audiencia – sala abs			Escenario – sala abs		
	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	Tutti	Omni	Secc	tutti
Músicos	5,1	6,2	7,4	5,1	6,1	6,4	5,5	5,7	4,1	4,9	6,4	5,6
Legos	5,4	6,4	6,7	4,4	6,7	7,1	5,9	7,4	5,2	5,2	7,2	6,0

Tabla 6.2. Comparativa de puntuaciones medias músicos – legos

Al comparar las medias se observa que, en la mayoría de casos, los legos valoran todas las auralizaciones con mayor puntuación que los músicos a excepción de la Omni en escenario en sala ajustada y Tutti en audiencia en sala ajustada. En el caso de la audiencia en sala ajustada la diferencia entre la puntuación más alta y más baja (1,3) es un punto menor que en el caso de los músicos (2,3). Esto puede significar que los legos responden con menor seguridad o tienen menor capacidad de ver diferencias con claridad.

Sin embargo, en el caso de la Omni en escenario en sala ajustada los legos la han valorado 0,7 puntos peor que los músicos y se han invertido las diferencias, en los legos la diferencia entre la configuración de fuente más valorada y la menos valorada es de 2,7 puntos mientras que la de los músicos es de 1,3. Una posible explicación a este hecho es que los legos perciben claramente que el sonido no les envuelve en la configuración Omni y reconocen falta de realismo en ello mientras que muchos músicos han centrado su atención en aspectos estéticos y el equilibrio entre instrumentos generándoles además, mayor inseguridad al responder. Algunos músicos dicen no estar seguros porque no tienen experiencia de escuchar a la orquesta desde el lugar del director.

Este hecho se ha acentuado en la sala absorbente. Los músicos sienten mucha confusión en las auralizaciones en sala absorbente y puntúan con menor diferencia entre ellas. Los legos podrían no sentir la presión que puede tener un músico al error. Generalmente los músicos se han enfrentado al test como una prueba de sus propias aptitudes como músicos mientras que un lego no. Sin embargo, los músicos son más exigentes a la hora de puntuar y sus valoraciones son inferiores a las de los legos para todos los casos de sala absorbente.

76

Otro dato apreciable es que, entre ambas medias, en cada configuración de sala y receptor solamente una de las configuraciones de fuente supera el 7. En la audiencia – sala los músicos valoran la configuración Tutti como la más realista con un 7,4 y los legos la valoran como la más realista también. En escenario – sala los legos valoran la configuración Tutti como la más realista con un 7,1, siendo la más realista también para músicos. En la audiencia – sala abs los legos valoran como más realista la configuración de secciones con un 7,4 y los músicos también la consideran la más realista. En la escenario – sala abs los legos valoran también como la más realista la configuración de secciones con un 7,2 y los músicos también la perciben como más real.

Estos datos reflejan que los tiempos de reverberación afectan directamente a la percepción de realismo. Para altos tiempos de reverberación, la configuración Tutti es aparentemente la más realista mientras que con un bajo tiempo de reverberación la configuración de Secciones resulta más realista al oyente.

Comparando los histogramas se confirman algunas deducciones realizadas a partir de las medias. La figura 6.11 muestra los histogramas acumulados en la posición audiencia en la sala ajustada de los legos y la figura 6.12 muestra el equivalente en músicos. Puede apreciarse cómo en el caso de los legos las pendientes son más constantes y están más próximas que en el histograma de los músicos. Estos valores tan dispersos muestran la falta de seguridad y gran variedad de respuestas por parte de los legos que antes se menciona. En los histogramas de los músicos hay zonas de mayor pendiente que indican gran cantidad de puntuaciones en esa

zona de la escala de valor y la mayor separación en los resultados entre configuraciones de fuente suscita mayor fiabilidad de las valoraciones.

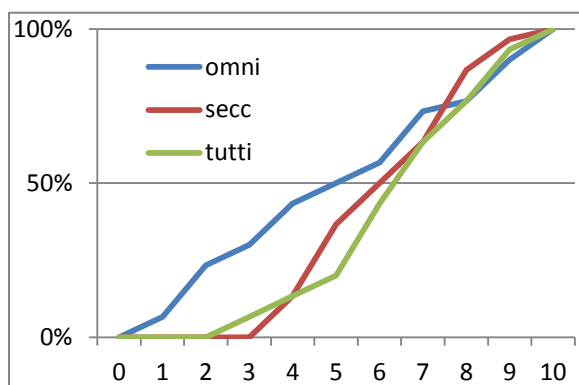


Figura 6.11. Histogramas acumulados de legos en audiencia – sala

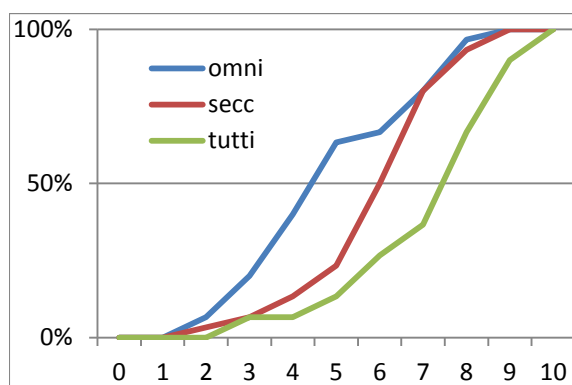


Figura 6.12. Histogramas acumulados de músicos en audiencia – sala

En la configuración escenario – sala los histogramas muestran cómo los legos distinguen con claridad la falta de realismo de la Omni al no percibir sonido directo lateral y cómo muestran dificultad a la hora de distinguir entre Secciones y Tutti (figura 6.13). Los músicos no diferencian con tanta claridad este hecho pero sí hay mayor diferencia entre Secciones y Tutti, valorando como más realista la Tutti (figura 6.14).

77

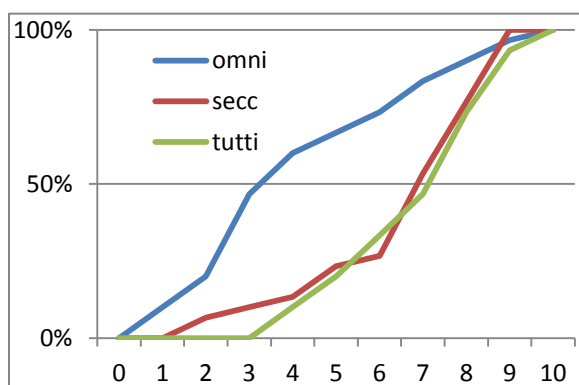


Figura 6.13. Histogramas acumulados de legos en escenario – sala

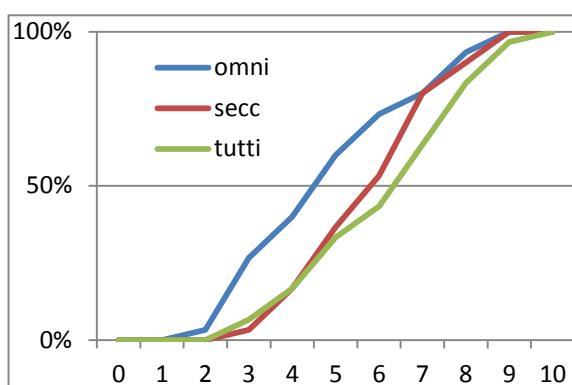


Figura 6.14. Histogramas acumulados de músicos en escenario – sala

En audiencia – sala abs el histograma de las Secciones muestra una pendiente abrupta entre el 7 y el 8 y no recibe ninguna puntuación por debajo de 4 lo que significa que se percibe con claridad como la versión más realista (figura 6.15). En los músicos, sin embargo, los histogramas acumulados de Secciones y Omni van casi emparejados lo que resulta poco fiable determinar cuál de los dos casos les resulta más realista. La configuración Tutti la perciben claramente menos realista. En especial esta gráfica, en comparación con su equivalente en legos, refleja aspectos estéticos y artísticos que han influido en las respuestas de los músicos (figura 6.16).

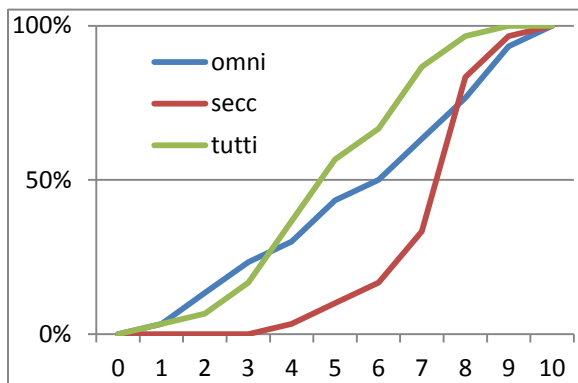


Figura 6.15. Histogramas acumulados de legos en audiencia – sala abs

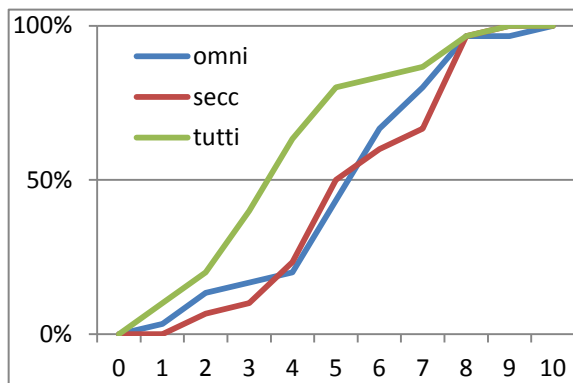


Figura 6.16. Histogramas acumulados de músicos en audiencia – sala abs



## CONCLUSIONES

El programa de software Odeon ha resultado ser una herramienta útil para la creación de auralizaciones orquestales. También demuestra ser una herramienta capaz de ajustarse a las características de una sala real para su posterior simulación aunque la opción de elevar las butacas 0,5 m ha supuesto una reducción del volumen total de la sala que puede haber afectado y que se ha visto reflejado en la necesidad de asignar valores excesivamente bajos para frecuencias altas en algunos materiales.

El programa de software Adobe Audition es una herramienta efectiva para el tratamiento de las pistas de audio tanto como para procesos de eliminación de ruido como en la realización de sesiones multipista para la mezcla de varios audios.

La función Playrec ha supuesto una importante ayuda en la configuración del test en Matlab.

El análisis estadístico por medio de histogramas acumulados, medias aritméticas y desviaciones típicas ha sido práctico y efectivo para las necesidades que han presentado los datos obtenidos de los test.

Los resultados de los test muestran valoraciones de los sujetos positivas en la sala ajustada estando las medias en el orden de realismo teórico. La configuración de fuente omnidireccional aparece como la considerada menos realista seguida de la configuración de Secciones y terminando por la configuración Tutti. Sin embargo, las desviaciones típicas muestran rangos muy amplios que restan fiabilidad aunque los histogramas acumulados han reforzado esta teoría.

En una sala extremadamente absorbente los resultados han mostrado valores inesperados encontrándose más realista, de forma generalizada, la configuración de Secciones. Estas valoraciones sugieren que el tiempo de reverberación influye en la percepción de realismo. Las condiciones acústicas alteran las auralizaciones generando fenómenos auditivos variados que pueden influir en lo que un sujeto percibe como realismo.

La ausencia de ruido, el equilibrio entre los sonidos de los diferentes instrumentos y la sensación envolvente o de anchura de fuente parecen ser elementos clave en la percepción de realismo de los audios.

Aunque los músicos poseen mayor capacidad de distinguir diferencias en el sonido más sutiles que los legos en música, han mostrado dificultad en reconocer elementos del sonido sin verse influidos por aspectos estéticos de la música.

La ambigüedad de la pregunta haciendo referencia exclusivamente al realismo percibido ha demostrado ser de gran complejidad para el participante del test. Ha provocado gran variedad de respuestas y valoraciones subjetivas. Sin embargo, ha permitido detectar algunos elementos clave que el sujeto busca en el sonido.

El sistema de puntuación del 0 al 10 ha permitido gran libertad al sujeto pero ha generado a la vez grandes diferencias en las respuestas e influyendo negativamente en los valores de desviación típica que han dependido de criterios, experiencias previas y la propia psicología de los participantes.

El análisis de los resultados demuestra que la auralización de una orquesta con una sola fuente omnidireccional es insuficiente para simular un entorno realista. La auralización multi-fuente es necesaria. Sin embargo, estos resultados no muestran de manera concluyente que exista la capacidad de percibir con claridad mayor realismo a partir de un determinado número de fuentes que represente a una orquesta completa. El empleo de globos de directividad en cada instrumento tampoco ha supuesto un cambio significativo en la percepción subjetiva.

## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras concluir este proyecto han quedado abiertas varias líneas de investigación en materia de auralizaciones de orquesta:

- Creación de un programa informático específico para generar auralizaciones con plantillas para test psicoacústicos.
- Definición de un sistema eficaz que genere retardos, modificaciones espectrales y efectos “chorus” para simular diferentes instrumentistas con un mismo audio.
- Creación de una base de datos de grabaciones anecoicas a cada músico de una orquesta con su instrumento de forma que haya una grabación original distinta correspondiente a cada músico de una gran orquesta sinfónica. Hay diferencias sonoras tanto en cada músico como en cada modelo de instrumento. Es importante que estas grabaciones tengan una alta relación señal-ruido.
- Idear una herramienta capaz de simular movimientos característicos de cada músico. Junto con la directividad, los movimientos que realiza un músico al practicar con su instrumento influye en la dirección que toma el sonido pudiendo llegar a ser perceptible.
- El empleo de análisis estadístico ANOVA sobre este estudio.
- Comparación de la percepción de realismo en salas con condiciones acústicas variadas. Estudio de la influencia del acondicionamiento acústico en la percepción de realismo.
- Profundizar en la búsqueda de diferentes combinaciones de configuraciones de fuente de músicos agrupados. Alcanzar un modelo óptimo.
- Equilibrar los instrumentos en cada auralización para que no sea un factor que influya en la percepción.
- Estudiar configuraciones de fuente de superficie en un modelo de test similar a este.
- Realizar un test con las auralizaciones de este PFC que pida medir el realismo percibido para una misma configuración de fuente entre los cuatro modelos receptor-sala. Posteriormente comparar estos datos con los recogidos de forma estadística en este PFC.



## REFERENCIAS

- [1] Auralization. M. Vorländer, Springer 2008.
- [2] State-of-the-art in auralization of concert hall models – What is still missing? Tapio Lokki, Lauri Savioja. Helsinki University of Technology, Department of Media Technology, Finland. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting. August 17-19, 2008, Reykjavic, Island.
- [3] Acoustics and the performance of Music. J. Meyer. Verlag das Musikinstrument, Frankfurt/Main, 1978.
- [4] The sound of the orchestra. J. Meyer. J. Audio Eng. Soc., 41(4):203-213, April 1993.
- [5] The physics of Musical instruments. J. Meyer, T. D. Rossing. Springer, New York, 1991.
- [6] Creating interactive virtual acoustic environments. L. Savioja, J. Huopaniemi, T. Lokki, R. Väänänen. J. Audio Eng. Soc. 47(9):675-705, 1999.
- [7] A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations. F. Ottono, J. H. Rindel. Acta Acustica united with Acustica, 91(5):902-906, 2005.
- [8] Evaluations of output from room acoustic computer modeling and auralization due to different sound source directionalities. Lily M. Wang, Mighelle C. Vigeant. Architectural Engineering Program, University of Nebraska (USA). September, 2007
- [9] The influence of directivity of musical instruments in a room. Ottono F, Rindel JH. Acta Acustica united with Acustica, 90(6):1178-84, 2004.
- [10] Directivities of orchestra instruments for auralization. J. Pätynen. EAA Symposium, Espoo, Finland, June 15-16, 2009.
- [11] Objective and subjective evaluations of the multi-channel auralization technique as applied to solo instruments. Mighelle C. Vigeant, Lily M. Wang (University of Nebraska, USA), Jens Holger Rindel (Technical University of Denmark). Applied Acoustics, Elsevier, 2010.
- [12] How many point sources are needed to represent strings in auralization? T. Lokki. Helsinki University of Technology, Finland. International Symposium on Room Acoustics. Sevilla, September 10-12, 2007.
- [13] Investigations of orchestra auralizations using the multi-channel multi-source auralization technique. Mighelle C. Vigeant, Lily M. Wang (University of Nebraska, USA), Jens Holger Rindel Technical (University of Denmark). Acta Acustica united with Acustica, vol. 94 (2008) 866-882.
- [14] Instruments of the orchestra. Roy Benet. Cambridge University Press, 1982. Trad. español. Los instrumentos de la orquesta. Akal, 1999.

- [15] A History of Western music. J. P. Burkholder, D.J. Grout, C. V. Palisca. 7<sup>th</sup> ed. W. W. Norton & Company, Inc. 2006. Trad. español. Alianza Editorial, 2008.
- [16] Longman handbook of orchestral instruments. Diagram Group. Longman, 1984.
- [17] The world of musical instruments. Allan Kendall. Hamlyn, 1972.
- [18] Bruckner Symphonies. Philip Barford. RICM, 1986.
- [19] Acústica Arquitectónica Aplicada (pág. 592). M. Recuero, Paraninfo, 1999.
- [20] Acústica Arquitectónica Aplicada (pág. 595-596). M. Recuero, Paraninfo, 1999.
- [21] Panel grande de cristal pesado (Mat. 10005). Harris, 1991.
- [22] Acústica Arquitectónica Aplicada (pág. 633). M. Recuero, Paraninfo, 1999.
- [23] Orquesta con instrumentos sobre podio; 1,5 m<sup>2</sup> por persona (Mat. 11000). Bobran, 1973.
- [24] <http://www.clfgroup.org>
- [25] <http://www.playrec.co.uk/>
- [26] An introduction to the psychology of hearing. Moore BCJ. 5<sup>a</sup> ed. Elseiver. London, England, 2004.